

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

17. listopadu 16, 708 33 Ostrava – Poruba

Hornicko-geologická fakulta

Institut ekonomiky a systémů řízení

**Identifikace vztahu topografie povrchu materiálu
k technologickému procesu**

Disertační práce

Doktorand:

Ing. Veronika Szarková

Školitel:

doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Studijní program:

Nerostné suroviny

Studijní obor:

Automatizace technologických procesů

Ostrava 2012

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na hodnocení kvality povrchu plechů vytvořených podélným válcováním za studena. Jedná se o hodnocení topografie povrchů plechů z nízkouhlíkové oceli, hlubokotažné oceli řady KOHAL o jakosti 697, IF oceli bez intersticií o jakosti 007, mikrolegované oceli o jakosti 676 a refosforizované oceli o jakosti 665. Topografie povrchu válcovaných plechů byla měřena kontaktním drsnoměrem SurfTest SJ 401 od firmy Mitutoyo a optickým profilometrem Micro Prof FRT (Fries Research & Technology GmbH). Způsob hodnocení je založen na porovnání výškových parametrů profilu povrchů s technologickými parametry laboratorní válcovací stolice DUO 210 SVa. Technologickými parametry jsou válcovací síla F_{roll} , absolutní úběr materiálu Δh a otáčky válců n_{roll} a jiné. Tyto technologické parametry ovlivňují válcovací proces a rovněž i kvalitu povrchu válcovaného plechu. Kvalita povrchu je velmi důležitá jak pro výrobce, tak i pro zákazníka. Je tudíž důležité mít dobrou znalost vztahu mezi kvalitativním stavem válcovaného materiálu a technologickými parametry jeho zpracování.

Na základě teoretických znalostí byl vyvinut nový postup pro stanovení hlavních technologických parametrů válcovací stolice. Hlavní rozdíl mezi předkládaným návrhem a současnými metodami výpočtu je následující: návrh je založen na znalosti deformačních vlastností materiálů, napěťově-deformačních stavů a na úběru v různých fázích válcování. Současné postupy naopak vycházejí ze statických výpočtů pomocí geometrie systému. Jde o parametry pracovního válce a okamžitou tloušťku plechu v mezeře mezi válci. Výpočty však nerespektují skutečné napěťově-deformační vlastnosti materiálu válcovaných plechů při dané rychlosti válců a vzhledem k válcovací síle a absolutního úběru. Návrh se zabývá vyváženým systémem: materiál - absolutní úběr - válcovací síla - válcovací rychlost. Tento postup umožňuje dosáhnout významného zvýšení provozní výkonnosti a zvýšení kvality procesu válcování.

Klíčová slova

Topografie povrchu, drsnost povrchu, podélné válcování za studena, hlavní technologické parametry, válcovací síla, absolutní úběr, automatizace.

ABSTRACT

This work is focused on surface roughness evaluation of sheets produced by longitudinal cold rolling process. This is concerned with the evaluation of surface topography of low carbon, deep drawing steel sheet of type KOHAL 697, interstitials free steel, microalloyed and rephosphorised steel. The surface topography of rolled sheets was measured using a contact profilometer Mitutoyo SurfTest SJ 401 and optical profilometer MicroProf FRT (Fries Research & Technology GmbH). A method of evaluation is based on comparison of surface profile height parameters of steel sheets with the technological parameters of the rolling mill DUO 210 SVa. The technological parameters are as follows: rolling force F_{roll} , absolute rolling reduction in thickness Δh , number of revolutions of the rolls n_{roll} and others. All these technological parameters have an impact both on the rolling process and the surface quality of rolled sheet. The surface quality is very important from both manufacturer's and customer's point of view. It is therefore important to have a great knowledge of the relationship between qualitative aspects of the rolled material and technological parameters of treatment.

Based on theoretical knowledge, it has been developed a new procedure for determining the main technological parameters of rolling mill. The main difference between the current and proposed method of calculating is as follows: the proposed method is based on knowledge of deformation properties of materials, it also requires knowledge of the state of stress and strain as well as knowledge of the reduction in thickness at different stages of rolling process. Existing methods are based on static calculations using geometry relationships in rolling. This is related to parameters of the working roll and instantaneous sheet thickness in the roll gap. However, the calculations do not respect the true stress-strain characteristics of material of rolled sheets at a certain speed of rolls and rolling force and absolute rolling reduction. The proposal deals with the well - balanced system - material - absolute rolling reduction - rolling force- rolling speed. This enables to significantly increase operational efficiency and quality improvement of the rolling process.

Keywords

Surface topography, surface roughness, longitudinal cold rolling, determining the main technological parameters, rolling force, absolute rolling reduction, automation.

„Prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracovala samostatně, podle pokynů školitele, s použitím uvedené literatury, v souladu se směrnicí děkana HGF_SME_10_001 disertační práce a autoreferát a v souladu se Studijním a zkušebním řádem pro studium v doktorských studijních programech Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

V souladu s §47a zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů souhlasím s publikováním textu své práce na webové stránce HGF VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 4.května 2012

Ing. Veronika Szarková

MOTIVACE

Existuje několik tendencí ve světovém vývoji válcování ocelových plechů, které jsou charakteristické pro konec 20. století a začátek 21. století: zvýšené požadavky na kvalitu za studena válcovaných plechů, zvýšení poptávky po ultra-tenkých pleších válcovaných za studena (konstrukční jakosti s tloušťkou 0,3 mm a nižší) a snaha ke snížení spotřeby energie ve všech etapách výroby válcovaných plechů za studena.

Tyto tendence podnítily rozvoj modelování procesů různých metod pro válcování za studena, protože uznávané matematické modely použité v kontrolních systémech neumožňovaly výpočet racionálních a nákladově efektivních technologických režimů [9]. Kvalita vývalku vytvořená prostřednictvím podélného válcování za studena závisí na řadě faktorů, které se účastní tvářecího procesu.

Cílem je nastavit jednotlivé technologické parametry tak, aby při požadované tloušťce válcovaného plechu byla dosažena žádaná kvalita povrchu tohoto válcovaného plechu.

Toto téma je aktuální nejen pro firmy zabývající se výrobou a zpracováním plechů, ale také pro jejich odběratele.

Ráda bych touto cestou upřímně poděkovala všem, kteří mne podporovali v průběhu přípravy disertační práce. Děkuji mému školiteli, doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D., za cenné rady a trpělivost, RNDr. Mileně Kušnerové, Ph.D. za konzultační připomínky. Ráda bych také poděkovala svým kolegům, Ing. Barboře Haluzíkové, Ing. Petrovi Hlaváčkovi, Ing. Jiřímu Klichovi, Ing. Vlastimilu Kuběnovi a Ing. Michalovi Zeleňákovi, za jejich konzultace a připomínky v průběhu studia. Děkuji rovněž všem pracovištím, na kterých byly vzorky, prezentované v disertační práci, vytvořeny (Katedra tváření kovů na Hutnickej fakulte TU v Košiciach a Katedra tváření materiálů na FMMI VŠB-TU v Ostravě), na kterých byla provedena chemická analýza (Katedra analytické chemie a zkoušení materiálu na FMMI VŠB-TU v Ostravě), dále pozorování metalografických výbrusů (Katedra materiálového inženýrství na FMMI VŠB-TU v Ostravě), změřena topografie povrchu (ÚGN AV ČR, v. v. i. a Koszalin University of Technology; Politechnika Swietokrzyska w Kielcach a Institut fyziky na HGF VŠB-TU v Ostravě) a byly provedeny tahové zkoušky (VÚHŽ Dobrá).

Tato práce vznikla za podpory projektů SGS No. SP2011/76, RMTVC No. CZ.1.05/2.1.00/01.0040 a GA ČR No. 101/09/0650. Poděkování také patří projektům MSK RRC/2010/01737, RRC/04/2010/36, RRC/04/2010/34 za finanční podporu, programu CEEPUS CII-PL-0007-05-0910 Politechnika Swietokrzyska w Kielcach a firmám U. S. Steel Košice, s.r.o., Measurement Technic Moravia Ltd. v Brně a PTS Josef Solnař, s.r.o. v Ostravě.

OBSAH

SEZNAMY ILUSTRACÍ	7
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	11
SEZNAM DOPORUČENÝCH ČESKÝCH ZKRATEK	14
1 ÚVOD	15
2 CÍL DOKTOSKÉ PRÁCE	17
3 AKTUÁLNÍ STAV PROBLÉMŮ	18
4 KLASIFIKACE TECHNOLOGICKÝCH FAKTORŮ A ZHODNOCENÍ MĚŘICÍCH METOD TOPOGRAFIE POVRCHU	20
4.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU VÁLCOVANÉHO PLECHU	20
4.2 MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHŮ PROSTŘEDNICTVÍM KONTAKTNÍ A OPTICKÉ PROFILOMETRIE	22
4.2.1 Kontaktní metoda	22
4.2.2 Optická metoda	24
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
5.1 MATERIÁL	26
5.2 VYTVOŘENÍ VZORKŮ	32
5.3 MĚŘENÍ VÁLCOVACÍ SÍLY	36
5.4 ZKOUŠKY TAHEM	39
5.5 MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU	41
5.5.1 Výsledky z drsnoměru SurfTest SJ 401	42
5.5.2 Výsledky z optického profilometru MicroProf FRT	43
6 VÝSLEDKY A DISKUSE	48
6.1 ZÁVISLOST KVALITY POVRCHU NA VLASTNOSTECH VÁLCOVANÉHO MATERIÁLU	48
6.2 STANOVENÍ VYHOVUJÍCÍCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ	50
6.3 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA KVALITU POVRCHU	55
6.4 ZÁVISLOST KVALITY POVRCHU NA VÁLCOVACÍ SÍLE	59
7 NÁVRH ŘÍZENÍ TECHNOLOGICKÉHO PROCESU PODÉLNÉHO VÁLCOVÁNÍ ZA STUDENA	62
7.1 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA VÝROBNOST	67
7.2 ANALÝZA VSTUPNÍHO SIGNÁLU, ŘÍDICÍ FUNKCE A PRINCIP REGULACE	70
7.3 NÁVRH STRUKTURY REGULAČNÍHO OBVODU	71
7.4 NÁVRH REGULÁTORU TYPU PID	72
7.5 NÁVRH REGULÁTORU TYPU PI	76
7.6 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ	77
8 ZÁVĚR	79
9 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	81
10 SEZNAM PŘÍLOH	86

SEZNAMY ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 –	Změna tvaru zrn v důsledku tváření	15
Obrázek 3.1 –	Přehled světové literatury v databázi SCIRUS	19
Obrázek 4.1 –	Ishikawův diagram (tzv. rybí kost) pro systém válcování	20
Obrázek 4.2 –	Schematická ilustrace senzoru kontaktního profilometru	22
Obrázek 4.3 –	Kontaktní profilometr SurfTest SJ 401	23
Obrázek 4.4 –	Dotykový hrot snímací jednotky	23
Obrázek 4.5 –	Princip měření drsnosti povrchů přístrojem SurfTest SJ 401	24
Obrázek 4.6 –	Princip optické metody	25
Obrázek 4.7 –	Optický profilometr MicroProf FRT	25
Obrázek 5.1 –	Spektrometr LECO GDS760A	26
Obrázek 5.2 –	Metalografický výbrus z nízkouhlíkové oceli	27
Obrázek 5.3 –	Metalografický výbrus z hlubokotažné oceli	28
Obrázek 5.4 –	Metalografický výbrus z IF oceli	29
Obrázek 5.5 –	Metalografický výbrus z mikrolegované oceli	30
Obrázek 5.6 –	Metalografický výbrus z refosforizované oceli	31
Obrázek 5.7 –	Parametry mechanických vlastností ocelových plechů pro automobilový průmysl	31
Obrázek 5.8 –	a) Princip deformace při podélném válcování; b) válcovací stolice DUO 210 SVa	33
Obrázek 5.9 –	Laboratorní válcovací stolice Q110	34
Obrázek 5.10 –	Detail umístění tenzometrů na válcovací stolici	37
Obrázek 5.11 –	Grafické znázornění průběhu válcovací síly v čase při válcovací rychlosti $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	38
Obrázek 5.12 –	Grafické znázornění průběhu válcovací síly v čase při válcovací rychlosti $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	38
Obrázek 5.13 –	Vazba mezi úběrem Δh a válcovací silou F_{roll} pro DUO 210 SVa	39
Obrázek 5.14 –	Schéma vzorku 1C s úběrem 0,4 mm s vyznačenou měřenou oblastí 1,6x1,6 mm	42
Obrázek 5.15 –	Proměřená oblast na vzorku v 16-ti ekvidistantních liniích ve směru válcování	46
Obrázek 5.16 –	Proměřená oblast na vzorku v 16-ti ekvidistantních liniích kolmých na směr válcování	46
Obrázek 5.17 –	Převodění signálů pomocí FFT na amplitudově-frekvenční spektrum	47
Obrázek 6.1 –	Grafické znázornění závislosti pevnosti v tahu na absolutním úběru u hlubokotažné oceli	48
Obrázek 6.2 –	Vliv pevnosti v tahu na střední aritmetické odchylky profilu povrchu u hlubokotažné oceli	49
Obrázek 6.3 –	Grafické znázornění závislosti technologických parametrů na absolutním úběru Δh	51
Obrázek 6.4 –	Pásmo deformace při podélném válcování	51
Obrázek 6.5 –	Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné oceli	53
Obrázek 6.6 –	Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné a nízkouhlíkové oceli	54

Obrázek 6.7 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné oceli	57
Obrázek 6.8 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné a nízkouhlíkové oceli	58
Obrázek 6.9 – Grafické znázornění závislosti technologických parametrů na změně absolutního úběru Δh	59
Obrázek 6.10 – Vliv válcovací síly na střední aritmetickou odchylku profilu povrchu u nízkouhlíkové a u hlubokotažné oceli	61
Obrázek 7.1 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u referenčního materiálu	63
Obrázek 7.2 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně finální drsnosti Ra_{Kohal} u referenčního materiálu	65
Obrázek 7.3 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně finální drsnosti Ra_{xc} pro jiné materiály	67
Obrázek 7.4 – Grafické znázornění počtu otáček podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu	70
Obrázek 7.5 – Grafické znázornění výkonu podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu	70
Obrázek 7.6 – Zjednodušené blokové schéma regulačního obvodu	71
Obrázek 7.7 – Blokové schéma měření a regulace v_{roll}	72
Obrázek 7.8 – Požadovaný průběh modulu kmitočtového přenosu řízení pro metodu optimálního modulu	74
Obrázek 7.9 – Schéma regulačního obvodu v prostředí Simulink	75
Obrázek 7.10 – Grafické porovnání výstupní válcovací síly v závislosti na čase u regulátorů typu PID	76
Obrázek 7.11 – Grafické porovnání výstupní válcovací síly v závislosti na čase u regulátorů typu PI	77
Obrázek 7.12 – Porovnání regulátorů typu PID a PI, jejichž parametry jsou určeny MOM	78

SEZNAM TABULEK

Tabulka 4.1 –	Parametry experimentální válcovací stolice DUO 210 SVa	21
Tabulka 4.2 –	Parametry válcovací tratě 3,5 KVARTO	21
Tabulka 5.1 –	Chemické složení materiálu z nízkouhlíkové konstrukční oceli PN EN 10263-2:2004	26
Tabulka 5.2 –	Chemické složení materiálu z hlubokotažné oceli řady KOHAL o jakosti 697	27
Tabulka 5.3 –	Chemické složení materiálu z IF oceli o jakosti 007	28
Tabulka 5.4 –	Chemické složení materiálu z mikrolegované oceli o jakosti 676	29
Tabulka 5.5 –	Chemické složení materiálu z refosforizované oceli o jakosti 666	30
Tabulka 5.6 –	Požadované tloušťky pro vzorky z nízkouhlíkové oceli	32
Tabulka 5.7 –	Požadované tloušťky pro vzorky z hlubokotažné oceli	32
Tabulka 5.8 –	Technologické parametry vytvořených vzorků z nízkouhlíkové oceli	34
Tabulka 5.9 –	Parametry vyprodukovaných vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	35
Tabulka 5.10 –	Parametry vyprodukovaných vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	35
Tabulka 5.11 –	Parametry vyprodukovaných vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	36
Tabulka 5.12 –	Výsledky zkoušek tahem	40
Tabulka 5.13 –	Výškové parametry hodnocení topografie povrchu z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	42
Tabulka 5.14 –	Výškové parametry hodnocení topografie povrchu z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	43
Tabulka 5.15 –	Výškové parametry hodnocení topografie povrchu vyprodukovaných válcovací stolicí Q110	43
Tabulka 5.16 –	Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli	44
Tabulka 5.17 –	Příslušné normované parametry hodnocení topografie povrchu z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli	45
Tabulka 6.1 –	Stanovení vyhovujících technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa	52
Tabulka 6.2 –	Číslené vyjádření technologických parametrů při změně absolutního úběru u materiálu KOHAL	52
Tabulka 6.3 –	Stanovení vyhovujících technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při válcování jiných materiálů	54
Tabulka 6.4 –	Číslené vyjádření technologických parametrů při změně absolutního úběru u nízkouhlíkové oceli	55
Tabulka 6.5 –	Predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru u referenčního materiálu KOHAL	56
Tabulka 6.6 –	Predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru u nízkouhlíkové oceli	58
Tabulka 6.7 –	Závislost střední aritmetické odchylky profilu povrchu na válcovací síle	60
Tabulka 7.1 –	Hodnoty technologických parametrů podle požadavků na absolutní úběr Δh	63
Tabulka 7.2 –	Hodnoty technologických parametrů podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu	65

Tabulka 7.3 –	Hodnoty technologických parametrů podle požadavků na finální drsnost pro jiné materiály	67
Tabulka 7.4 –	Výkon podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu	69

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	Amplituda [μm]
A_{el}	Tažnost [%]
A_{el10}	Tažnost na naměřené délce $10d$ (kde d je průměr oceli) [%]
A_{elgt}	Tažnost na maximu tahové křivky [%]
A_{elt}	Skutečná tažnost [%]
$A_{wy}(\omega)$	Amplitudová kmitočtová charakteristika [-]
α_0	Záběrový úhel [$^\circ$]
b	Šířka vzorku [mm]
b_0	Původní šířka vzorku [mm]
b_1	Šířka po příslušném úběru [mm]
b_A	Šířka měřené oblasti na vzorku [mm]
b_s	Střední šířka válcovaného plechu [mm]
C_{rokX}	Cena výkonu za rok pro DUO 210 SVa [Kč]
d_{In}	Porucha na vstupu [-]
d_{Ot}	Porucha na výstupu [-]
D_{gr}	Velikost zrna [μm]
D_{grC}	Vyhovující velikost zrna [μm]
D_{grX}	Velikost zrna u referenčního materiálu [μm]
D_{grXY}	Velikost zrna u jiných materiálů [μm]
D_{WR}	Průměr pracovních válců [mm]
Δb	Absolutní šířka [mm]
Δh	Absolutní úběr [mm]
Δh_X	Zvolený absolutní úběr [mm]
Δh_{XY}	Zvolený absolutní úběr u jiných materiálů [mm]
Δl	Absolutní délka [mm]
e	Regulační odchylka [-]
E	Youngův modul pružnosti (modul pružnosti v tahu) [MPa]
$E_{ddKohal}$	Youngův modul pružnosti pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [MPa]
E_{Lcs}	Youngův modul pružnosti pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [MPa]
ε_t	Deformace [-]
f	Frekvence [mm^{-1}]
F_{roll}	Válcovací síla [N]
F_{rollC}	Vyhovující válcovací síla [N]
$F_{rollKohal}$	Válcovací síla pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [N]
$F_{rollLcs}$	Válcovací síla pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [N]
$F_{rollreg}$	Regulovaná válcovací síla [N]
F_{rollX}	Řízená válcovací síla u referenčního materiálu [N]
F_{rollXY}	Řízená válcovací síla u jiných materiálů [N]
$G_M(s)$	Obrazový přenos elektromotoru [-]
$G_{Mc}(s)$	Obrazový přenos měřicího členu [-]
$G_{Pr}(s)$	Obrazový přenos převodovky [-]
$G_{TP}(s)$	Obrazový přenos technologického procesu [-]
h	Tloušťka vzorku [mm]
h_0	Původní tloušťka vzorku [mm]

h_l	Tloušťka po příslušném úběru [mm]
h_s	Střední tloušťka válcovaného plechu [mm]
h_{sC}	Vyhovující střední tloušťka válcovaného plechu [mm]
h_{sX}	Střední tloušťka válcovaného plechu u referenčního materiálu [mm]
h_{sXY}	Střední tloušťka válcovaného plechu u jiných materiálů [mm]
h_n	Tloušťka po n -tém úběru [mm]
I_{Kp}	Indexový poměr [-]
k	Konstanta vyjadřující vlastnosti tenzometru (jeho citlivost) [-]
k_M	Konstanta elektromotoru [-]
k_{Pr}	Konstanta převodovky [-]
k_l	Optimální válcovací síla [kN]
K	Materiálová konstanta [-]
K_{DUO}	Technická konstanta [-]
K_P	Konstanta plasticity materiálu [MPa ⁻¹]
$K_{PddKohal}$	Konstanta plasticity hlubokotažné oceli řady KOHAL [MPa ⁻¹]
K_{PLcs}	Konstanta plasticity nízkouhlíkové oceli PN EN 10263-2:2004 [MPa ⁻¹]
K_{ts}	Kritérium tvářitelnosti za studena [%·MPa ⁻¹]
K_z	Ztrátový koeficient [-]
l	Měřená délka [mm]
l_0	Původní délka vzorku [mm]
l_l	Délka po příslušném úběru [mm]
l_A	Délka měřené oblasti na vzorku [mm]
l_c	Minimální délka vzorku pro tahovou zkoušku [mm]
l_d	Délka pásmové deformace [mm]
l_{dC}	Vyhovující délka pásmové deformace [mm]
l_{dX}	Délka pásmové deformace u referenčního materiálu [mm]
l_{dXY}	Délka pásmové deformace u jiných materiálů [mm]
l_i	Distance měření [mm]
l_n	Normalizovaná délka [mm]
n	Exponent deformačního zpevnění [-]
n_{roll}	Počet otáček válce [s ⁻¹]
n_{rollC}	Vyhovující počet otáček válce [min ⁻¹]
$n_{rollKohal}$	Počet otáček válce pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [min ⁻¹]
$n_{rollLcs}$	Počet otáček válce pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [min ⁻¹]
n_{rollX}	Počet otáček válce u referenčního materiálu u válcovací stolice DUO 210 SVa [min ⁻¹]
$n_{rollXKvarto}$	Počet otáček válce u referenčního materiálu u válcovací stolice typu 3,5 KVARTO [min ⁻¹]
n_{rollXY}	Počet otáček válce u jiných materiálů [min ⁻¹]
P	Cena za tunu oceli [Kč]
Q_{DUO}	Výkon u válcovací stolice DUO 210 SVa [t]
Q_{Kvarto}	Výkon u válcovací stolice typu 3,5 KVARTO [t]
Q_{Froll}	Tvářecí faktor [-]
Q_{FrollC}	Vyhovující tvářecí faktor [-]
$Q_{FrollKohal}$	Tvářecí faktor pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [-]
$Q_{FrollLcs}$	Tvářecí faktor pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [-]
Q_{FrollX}	Tvářecí faktor u referenčního materiálu [-]
$Q_{FrollXY}$	Tvářecí faktor u jiných materiálů [-]

r	Koeficient normálové anizotropie [-]
R	Poloměr válců [mm]
R^2	Koeficient determinace (hodnota spolehlivosti) [-]
Ra	Střední aritmetická odchylka profilu [μm]
Ra_C	Vyhovující střední aritmetická odchylka profilu [μm]
Ra_{Kohal}	Střední aritmetická odchylka profilu pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [μm]
Ra_{Lcs}	Střední aritmetická odchylka profilu pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [μm]
Ra_X	Střední aritmetická odchylka profilu u referenčního materiálu [μm]
Ra_{Xc}	Kalkulovaná střední aritmetická odchylka profilu [μm]
Ra_{XY}	Střední aritmetická odchylka profilu u jiných materiálů [μm]
R_{eH}	Výrazná mez kluzu [MPa]
R_m	Pevnost konstrukční oceli [MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu [MPa]
Rq	Střední kvadratická odchylka výškových fluktuací [μm]
Rz	Největší výška nerovnosti profilu [μm]
ρ	Hustota hlubokotažné oceli [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
s	Komplexní proměnná [-]
S_h	Horizontální průmět stykové plochy provalku s pracovní částí válce [mm^2]
S_{hC}	Vyhovující horizontální průmět stykové plochy provalku s pracovní částí válce [mm^2]
σ_t	Napětí [MPa]
σ_s	Povrchové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
σ_{sC}	Vyhovující povrchové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
σ_{sKohal}	Povrchové napětí pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
σ_{sLcs}	Povrchové napětí pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
σ_{sX}	Povrchové napětí u referenčního materiálu [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
σ_{sXY}	Povrchové napětí u jiných materiálů [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
T_1, T_2	Časová konstanta [s]
T_M	Časová konstanta elektromotoru [s]
$T_{M\check{C}}$	Setrvačnost měřicího členu [s]
T_{Pr}	Časová konstanta převodovky [s]
T_{roll}	Počet válcovacích stupňů (počet válcovacích stolic ve válcovací trati) [-]
u	Akční veličina [-]
$U(s)$	Obraz akční veličiny [-]
v_{roll}	Válcovací rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_{rollC}	Vyhovující válcovací rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
$v_{rollKohal}$	Válcovací rychlost pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
$v_{rollLcs}$	Válcovací rychlost pro nízkouhlíkovou ocel PN EN 10263-2:2004 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
$v_{rollreg}$	Regulovaná válcovací rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_{rollX}	Válcovací rychlost u referenčního materiálu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_{rollXY}	Válcovací rychlost u jiných materiálů [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
$V_{roll}(s)$	Obraz válcovací rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
w	Žádaná veličina [-]
ω	Úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
$\Omega(s)$	Obraz úhlové rychlosti rotoru [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
y	Regulovaná veličina [-]

SEZNAM DOPORUČENÝCH ČESKÝCH ZKRATEK

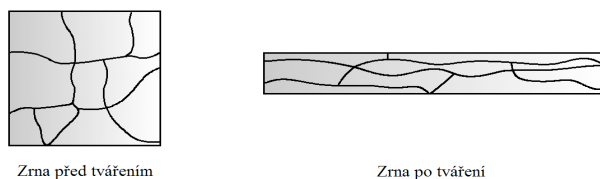
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
MČ	Měřicí člen
MOM	Metoda optimálního modulu
MPM	Metoda požadovaného modelu
PI	Proporcionálně integrační analogový regulátor
PID	Proporcionálně integračně derivační analogový regulátor
R	Regulátor
S	Regulovaná soustava
TRIP ocel	Transformation Inducted Plasticity

1 ÚVOD

V současné době se přibližně 90 % až 96 % materiálů v hutním průmyslu zpracovává válcováním. Velmi podstatně se zvyšují nároky jak na užité vlastnosti, tak i na snižování výrobních nákladů. Jde tedy o úsporu energie a materiálů. Dosažení těchto cílů nelze zajistit bez vysokého stupně automatizace, řízení a kontroly celého výrobního postupu počítači s maximálním vyloučením manuálních zásahů při výrobě. Tyto kvalitativní změny při dalším rozvoji válcování oceli vyžadují hlubší a komplexnější teoretické a metalurgicko-technologické znalosti pracovníků v oblasti projekce, výzkumu i výroby válcované oceli. Kontinuální kontrola kvality materiálu a jakosti povrchu v průběhu procesu válcování je součástí těchto úkolů a souvisí se zajišťováním plné automatizace válcovacích tratí [11, 37].

Charakteristickým znakem tváření za studena je intenzivní zpevňování kovu s růstem celkové deformace, která se skládá z pružné a z plastické části. U válcování za studena probíhá plastická deformace, která neprobíhá současně v celém objemu kovu jako u některých přímých pochodů (zápustkové kování, lisování), ale pouze v jeho relativně malé části, která se nazývá pásmo deformace. Plastická deformace je způsobena pohybem dislokací a jejich hustotou. K pohybu dislokací dochází při překročení kritického skluzového napětí, tj. dochází k trvalému posuvu atomů, které zůstávají zachovány i po skončení účinku působících vnějších sil. Při kluzovém pohybu dislokací krystalovou mřížkou se do cesty pohybujícím se volným dislokacím staví řada překážek, které ztěžují pohyb a zvyšují hodnotu kritického skluzového napětí. Tím dochází k postupnému zpevňování tvářeného kovu na úkor poklesu jeho plastických vlastností. To při pomalém průběhu odpevňovacích procesů (při velmi nízkých deformačních teplotách) vede k úplnému vyčerpání plasticity a ke vzniku lomů [1, 10, 15, 19, 28, 30, 32, 34].

Tváření za studena je tvářením pod rekrytalizační teplotou, tj. pod hodnotou 30 % teploty tání tvářeného materiálu. Tehdy dochází ke zpevňování materiálu a k nárůstu odporu proti dalšímu tváření (v konečné fázi dochází k vyčerpání plastičnosti materiálu). Zrna se deformují ve směru tváření, vytváří se textura a dochází tak k anizotropii mechanických vlastností (viz obr. 1.1).



Obrázek 1.1 – Změna tvaru zrn v důsledku tváření

Zpevněním se zvyšují mechanické hodnoty (mez pevnosti a mez kluzu) a klesá tažnost. Zahříváním kovu je možné obnovit jeho deformační schopnost, tím kov získává opět schopnost být plasticky tvářen. Výhodou je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch a zlepšování vlastností materiálu jeho zpevněním. Nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, dále vzniká nerovnoměrné zpevňování a tvárnost materiálu je nedostatečná. Výsledkem procesu je vývalek. Podle směru, kterým válcovaný materiál prochází pracovními válci, podle uložení os válců vzhledem k válcovanému materiálu a podle průběhu deformace válcování dělíme válcování na podélné, příčné a kosé. Válcováním lze

vyrábět velké množství polotovarů rozmanitých tvarů, mezi něž patří profily, plechy, dráty, trubky [1, 10-12, 14, 15, 19, 38, 43].

2 CÍL DOKTORSKÉ PRÁCE

Válcováním rozumíme kontinuální proces, při kterém se tvářený materiál deformuje mezi otáčejícími se pracovními válci za podmínek převažujícího všestranného tlaku. Válcovaný materiál se mezi válci deformuje, jeho výška se snižuje, materiál se prodlužuje a současně rozšiřuje a mění se i rychlost, kterou válcovaný materiál z válcovací stolice vystupuje. Válcování se provádí hlavně za tepla, ale i za studena [11, 37].

Kontinuální válcování za studena je důležitý proces v hutním průmyslu. Jeho výkon přímo ovlivňuje kvalitu konečného produktu. Tento proces je velmi složitý a vyžaduje multidisciplinaritu, tj. zastoupení oborů výpočetní technika, automatické řízení, mechanika, materiálové inženýrství a další. Jakékoliv správně navržené renovace mohou přinést velký finanční zisk pro podnik ve zvýšení výkonu, jakosti a celkové podnikatelské konkurenceschopnosti [1, 10, 15, 19, 28, 30, 32].

Cílem doktorské práce je tedy identifikovat vztah mezi technologickými parametry válcování a topografií povrchu získaného produktu. Zejména jde o hledání vazeb mezi technologickými parametry (např. úběrem materiálu, válcovací silou, válcovací rychlostí) experimentální válcovací stolice a topografií povrchu produktu a jejich využití pro kontinuální válcování.

Dílčí cíle disertační práce:

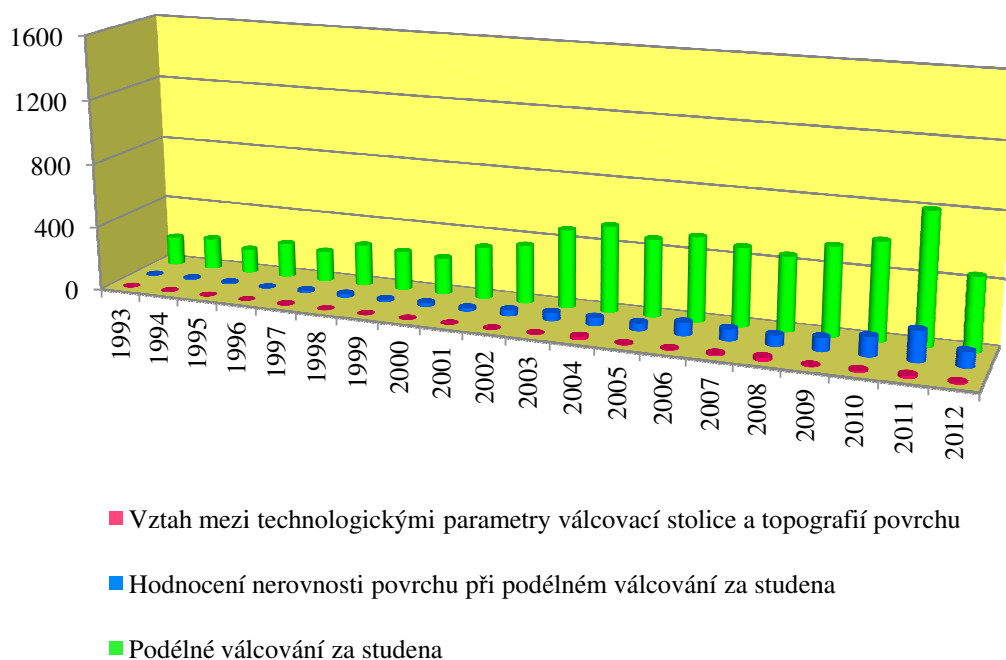
1. Shrnutí a zhodnocení současného stavu podélného válcování za studena.
2. Klasifikace technologických faktorů a zhodnocení měřicích metod topografie povrchu.
3. Příprava vzorků, analýza, interpretace experimentálních dat z měření topografie povrchu produktu.
4. Hledání vazeb mezi technologickými parametry a topografií povrchu produktu.
5. Návrh řízení technologického procesu podélného válcování za studena na základě měření drsnosti povrchu získaného produktu.

3 AKTUÁLNÍ STAV PROBLÉMU

Cílem procesu válcování kovů za studena je vyrábět ploché vývalky z kovů velmi vysoké kvality, kde vysoká kvalita znamená shodu výsledného produktu s požadovanými rozměry plechu. V ideálním válcování za studena se vyžaduje aplikace regulace bez zpětné vazby. Je to proto, že různé pohony stolice jsou přednastaveny podle předem propočítaného válcovacího plánu, který je založen na požadovaném úběru, válcovacím tlaku a rovinnosti plechů. Propočítaný válcovací plán zvažuje schopnosti zatížení různých tratí plus možnosti a omezení pohonů stolice, pro které jsou typické umístění pracovních válců a jejich rychlost. S ideálním modelem trati, ideálními pohony a při absenci odchylek a poruch lze přesně předpovědět nastavení výkonu tak, aby byla regulace otevřeného obvodu dostačující pro výrobu vysoce kvalitních produktů.

Obdobně jako téměř ve všech průmyslových procesech je však reálný proces válcování za studena vzdálený ideálnímu procesu, neboť je to proces složitý a nelineární. S ohledem na velkou četnost odchylek a poruch má využití zpětné vazby zásadní význam pro dosažení požadované kvality finálního výstupu, pro zajištění stability válcovny a pro snížení vnitřního napětí a tloušťky materiálu. Proces je doprovázen dlouhými časovými prodlevami, které výrazně mění válcovací rychlosti a můžou měnit vlastnosti tratě v průběhu normálního provozu. U široké škály produktů musí být válcovací trať přizpůsobena jejich vlastnostem, protože dochází často k výrazným změnám v průběhu zpracování jak u kusové výroby, tak u zpracování sériových produktů. Všechny uvedené vlivy vytvářejí velmi náročný úkol pro kontrolního technika. Kromě zachování dobrého výkonu (při zachování pevné tolerance v střední tloušťce na výstupu trati) i při značných odchylkách a poruchách musí být regulátor trati schopen plnit další funkce a manipulace také za jiných podmínek normálního provozu. Jde o (1) udržení dobré výkonnosti v průběhu zrychlení a zpomalení tratě, (2) snižování vnitřního napětí plechu, (3) upravování tloušťky plechu a kdekoli na trati, (4) umožnění velmi rychlé změny v produktu pro kontinuální stolice, (5) kontrola rozměrů pásu. Kromě toho musí algoritmus regulátoru být schopen běžet na hardwarové a softwarové platformě dostatečně rychle a správně řídit proces [8, 9, 14, 20].

Počet prací věnovaných ve světové odborné literatuře problematice podélného válcování za studena a jeho vlivu na topografie povrchu válcovaných plechů v průběhu posledních dvaceti let je graficky znázorněn na obr. 3.1 [32].



Obrázek 3.1 – Počet prací světové literatury věnovaných dané problematice v posledních dvaceti letech podle databáze SCIRUS [32]

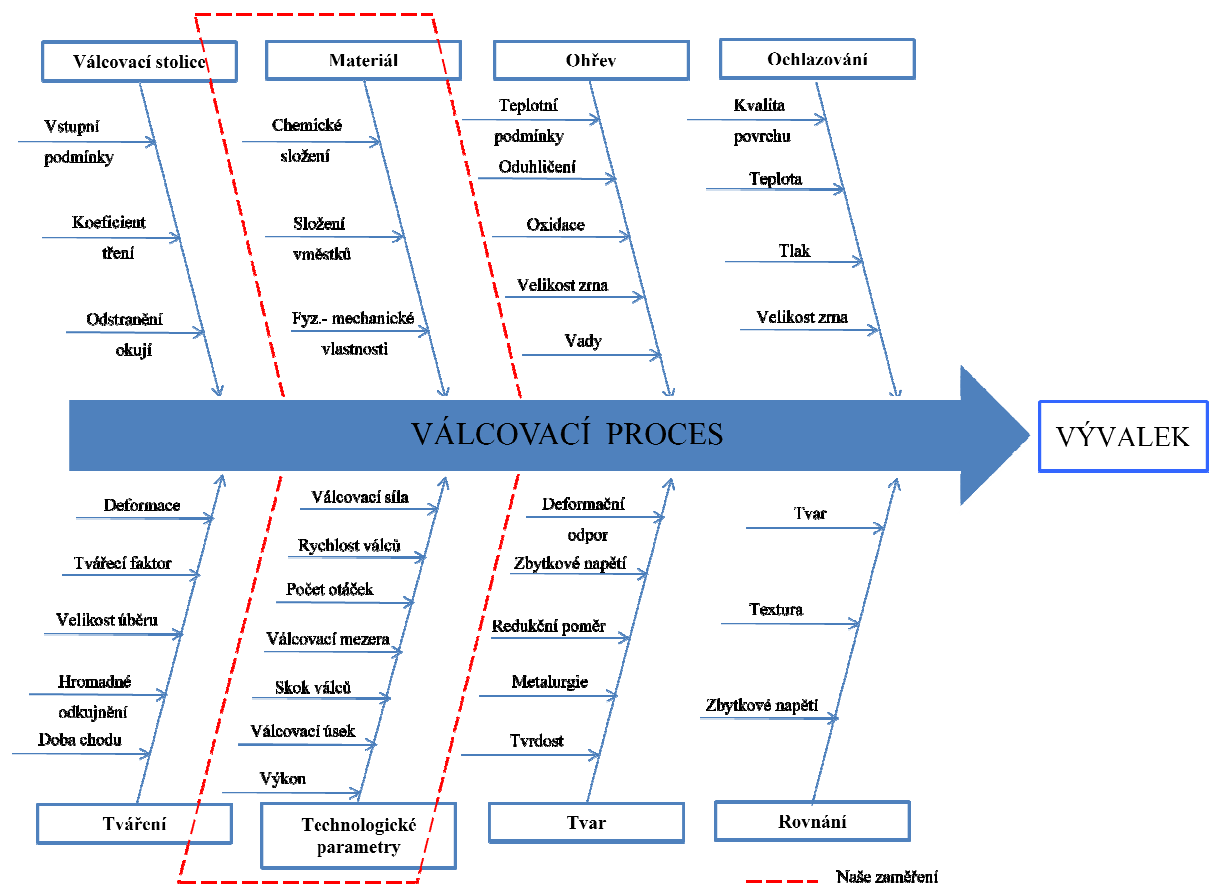
Z grafu vyplývá, že z celkového počtu článků o dané problematice se 90 % zabývá podélným válcováním za studena, 9 % hodnotí nerovnosti povrchu při tomto válcování a 1 % se zabývá vztahem mezi technologickými parametry válcovací stolice a topografií válcovaného povrchu. I když je toto téma aktuální nejen pro firmy zabývající se výrobou plechů, ale také pro jejich odběratele, tak výzkum v oblasti vztahů mezi technologickými parametry válcování a topografie povrchu probíhá vzhledem k jejich složitosti velmi zřídka. Přesto se tato práce pokouší o identifikaci vazeb mezi technologickými parametry válcovací stolice a kvalitou povrchu materiálu.

4 KLASIFIKACE A ZHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÝCH MĚŘICÍCH METOD FAKTORŮ TOPOGRAFIE POVRCHU

Zachování vysoké kvality materiálu vyžaduje dobrou znalost vztahu mezi okamžitým kvalitativním stavem válcovaného materiálu a parametry technologie při potřebě zvyšování výkonu [3-7, 12].

4.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU VÁLCOVANÉHO PLECHU

Finální kvalita vývalku vytvořená prostřednictvím podélného válcování za studena závisí na řadě faktorů, které se účastní tvářecího procesu. Cílem je určit výslednou kvalitu povrchu, která je funkcí geometrických charakteristik a vstupních faktorů u použité technologie. Hodnocení kvality vytvořených povrchů je možné posuzovat na základě mikro-geometrických charakteristik. Na obr. 4.1 je uveden základní přehled vstupních faktorů procesu válcování ve vztahu k výstupním parametrům vývalku. Parametry, které nejvíce ovlivňují drsnost povrchu při válcování za studena a na které se tato práce zaměřuje, jsou označeny červenou přerušovanou čarou.



Obrázek 4.1 – Ishikawův diagram (tzv. rybí kost) pro systém válcování [17]

Při každé změně některého z hlavních technologických parametrů (viz tab. 4.1) se válcovaný materiál přizpůsobuje a mění svoje původní strukturně deformační vlastnosti. K takovým změnám technologických parametrů dochází při potřebě zvyšování výkonu. Není-li vliv zvýšení válcovací rychlosti, válcovacího tlaku nebo úběru materiálu dostatečně respektován, může docházet k narušení strukturně deformačního stavu materiálu na výstupu. Zajištěním kontinuální kontroly kvality materiálu a jakosti povrchu v průběhu procesu válcování v reálném čase, ale taktéž využitím verifikované teoretické predikce v návrhu technologie, lze předcházet i při vysokých nárocích na kvantitativní ukazatele výroby případným negativním dopadům na kvalitu finálního produktu [3-7, 12].

Tabulka 4.1 – Parametry experimentální válcovací stolice DUO 210 SVA

Parametr	Rozměry
Vzdálenost mezi stojany	380 mm
Průměr pracovních válců	210 mm
Maximální válcovací síla	350 kN
Válcovací rychlost	0,5 – 1,2 m·s ⁻¹
Šířka plechu	0,4 – 100 mm
Maximální úběr	10 mm
Válcovací mezera	20 mm
Výkon elektromotoru	34 kW
Napětí na elektromotoru	380 V

Je třeba poznamenat, že údaje uvedené v tab. 4.1 jsou parametry experimentální válcovací stolice DUO 210 SVA, která nemá parametry velkých válcovacích stolic typu 3,5 KAVRTO (viz tab. 4.2). Duo (dvouválcová) válcovací stolice je základním konstrukčním, dnes již málo používaným typem. Její přednosti jsou dobré záběrové schopnosti, rovnací účinek a provádění speciálních povrchových úprav pásů (leštění, matování a drénování povrchu pásů) [11].

Čtyřválcová stolice (kvarto) je nejpoužívanějším typem válcovací stolice. Dva vnitřní pracovní válce mají menší průměr, jsou poháněné a opírají se o dva vnější opěrné válce většího průměru. Tím je omezen průhyb válců a zvětšuje se tuhost válcovací stolice. Osy všech válců leží v jedné rovině. Průměr opěrných válců bývá asi třikrát větší než průměr pracovních válců. Menší průměr pracovních válců je výhodný, neboť omezuje válcovací síly, průhyb a zploštění válců a spotřebu energie a při válcování umožňuje pracovat s většími tloušťkami úběrů pásů [11].

Tabulka 4.2 – Parametry válcovací tratě 3,5 KVARTO [45]

Parametr	Rozměry
Průměr pracovních válců	940 - 1005 mm
Průměr opěrných válců	1750 – 1900 mm
Minimální tloušťka plechů	5 mm
Maximální tloušťka plechů	80 mm
Válcovací rychlost	17 – 25 m·s ⁻¹
Maximální šířka plechů	3300 mm
Maximální délka plechů	16000 mm
Maximální válcovací síla	62000 kN

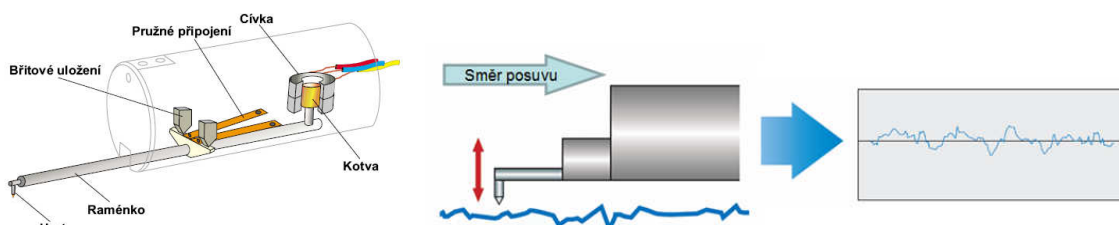
Z tab. 4.1 a 4.2 vyplývá, že údaje budou u každé válcovací stolice jiné. Proti válcovací stolici duo má stolice kvarto hlavní přednost v tom, že zvyšuje rozměrovou přesnost vývalků, snižuje minimální válcovatelnou tloušťku pásů a je hospodárnější [11].

4.2 MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHŮ PROSTŘEDNICTVÍM KONTAKTNÍ A OPTICKÉ PROFILOMETRIE

S rozvojem vědy a techniky a uplatňováním nových poznatků do praxe dochází ke zvětšování významu problematiky jakosti povrchů součástí. Ta do značné míry ovlivňuje jak jejich životnost, tak spolehlivost a závisí na ní především přesnost chodu, hlučnost, odolnost proti korozi a opotřebení či únavová pevnost. Kontrola kvality povrchů je v dnešní době velmi významnou součástí přípravy povrchů u všech typů technologií používaných k jejich vytváření. Pro účely disertační práce byly vytvořeny povrchy podélným válcováním za studena a hodnoceny prostřednictvím kontaktní a optické profilometrie [5, 31].

4.2.1 Kontaktní metoda

Kontaktní neboli dotyková metoda (viz obr. 4.2) je doposud nejrozšířenější metoda, zejména ve strojírenské praxi. Měřicí hrot se pohybuje po povrchu ve stanoveném rozsahu snímané délky. Nerovnost povrchu způsobuje výchylku hrotu, čímž je prostřednictvím A/D převodníku získáván základní signál, který je nositelem informace o textuře. Analýza signálu se uskutečňuje v registrační jednotce měřicího přístroje, nebo podle přiloženého softwaru.



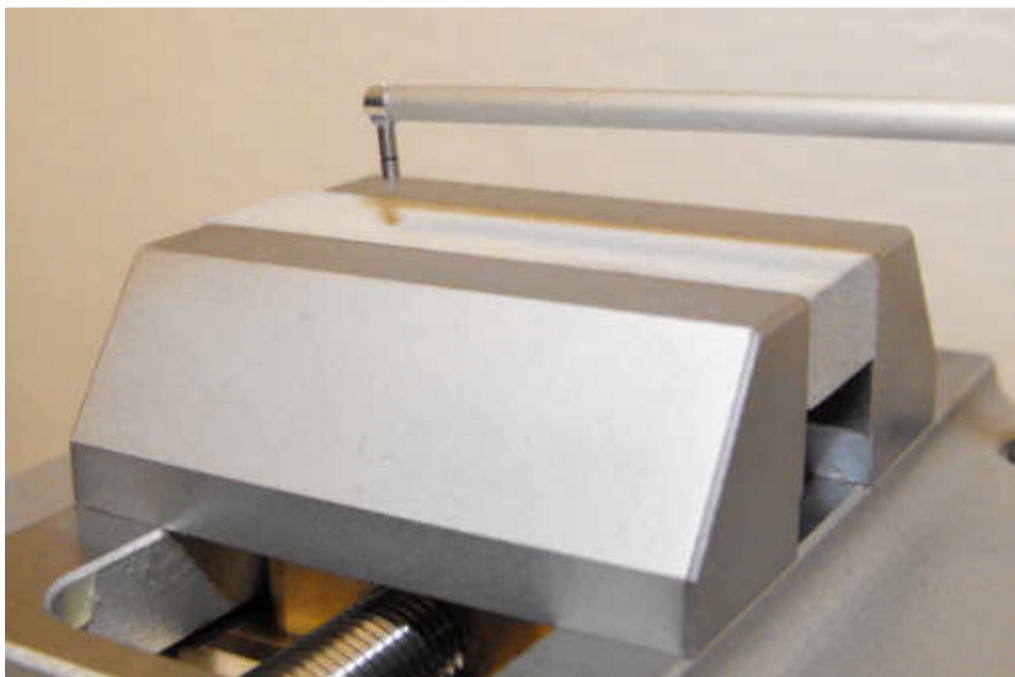
Obrázek 4.2 – Schematická ilustrace senzoru kontaktního profilometru [35]

Příkladem kontaktního profilometru, prostřednictvím kterého jsem měřila povrchy experimentálních materiálů, je SurfTest SJ 401 (viz obr. 4.3). SurfTest SJ 401 je dotykový (hrotový) přístroj pro měření drsnosti povrchů určených pro dílenské použití. Umožňuje hodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoha dalších parametrů podle různých národních norem a mezinárodních norem. Naměřené hodnoty se zobrazují digitálně nebo graficky na dotykovém displeji, a to s možností výstupu na zabudované tiskárně.



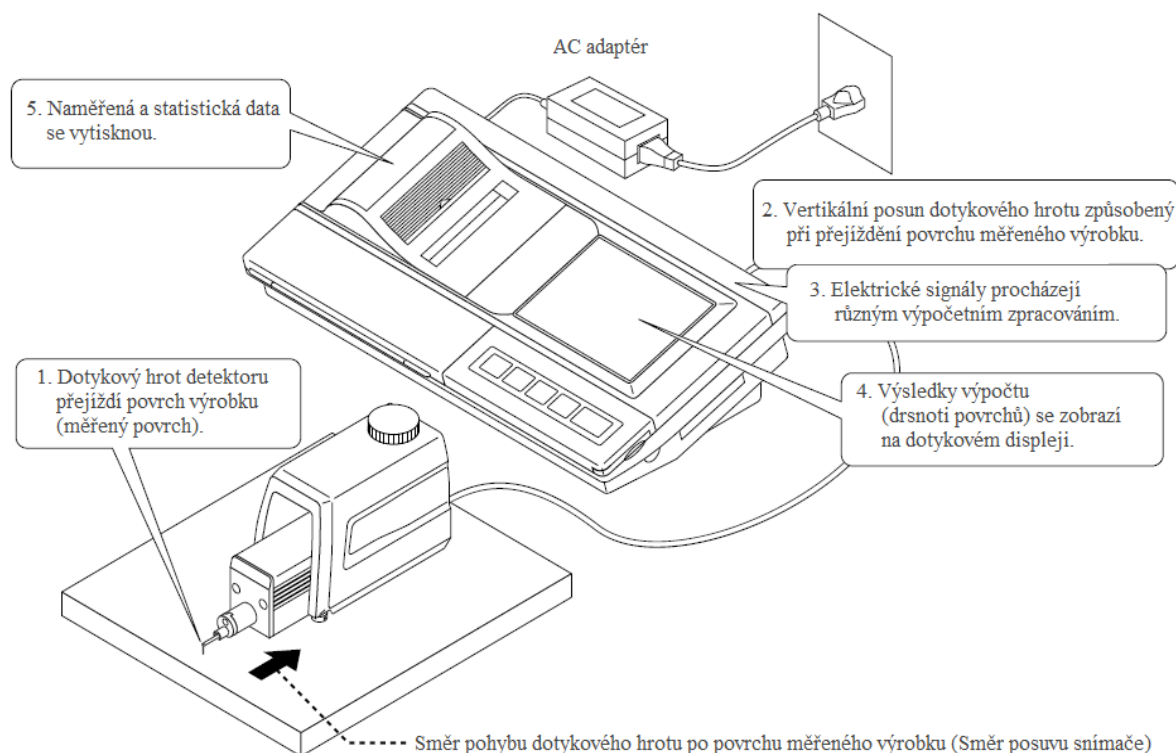
Obrázek 4.3 – Kontaktní profilometr SurfTest SJ 401

Dotkový hrot snímací jednotky přístroje zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu měřeného výrobku (obr. 4.4).



Obrázek 4.4 – Dotkový hrot snímací jednotky

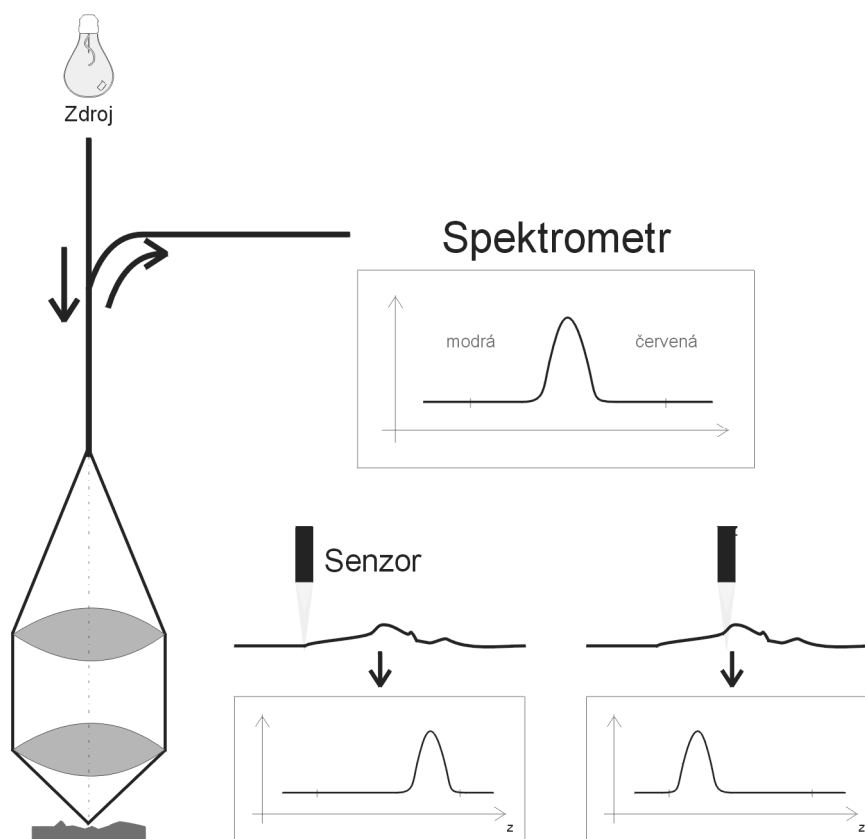
Drsnost povrchu se stanoví na základě vertikálního posunu dotkového hrotu způsobeného přejížděním hrotu po nepravidelnostech povrchu. Výsledky měření se zobrazují digitálně nebo graficky na dotkovém displeji (viz obr. 4.5).



Obrázek 4.5 – Princip měření drsnosti povrchů přístrojem SurfTest SJ 401 [40]

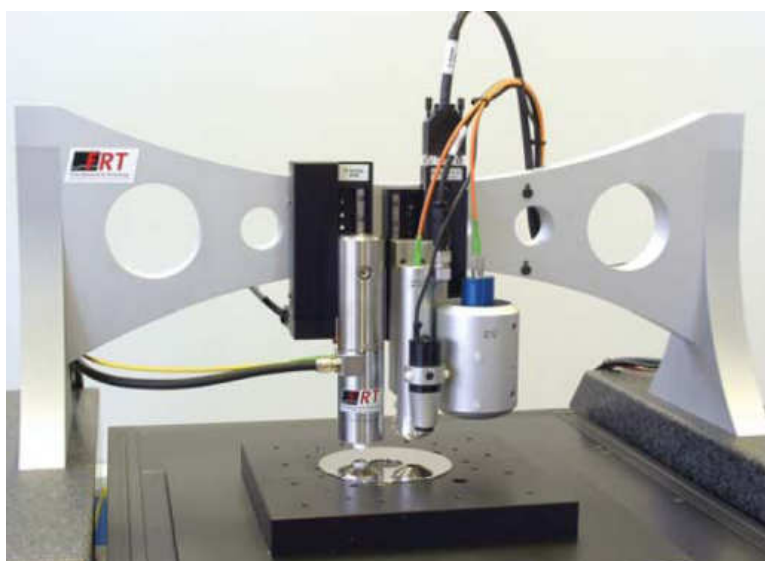
4.2.2 Optická metoda

Použitá optická metoda využívá jevu chromatické aberace spojné čočky. V optickém profilometru MicroProf FRT je bílé světlo přiváděno ze zdroje optickým vláknem do optického senzoru, jehož základním prvkem je spojná čočka. Tato spojná čočka fokusuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Po dopadu na studovaný povrch vzorku je nejlépe fokusovaná monochromatická složka optimálně odražena zpět do zmíněné čočky a optickým vláknem přivedena do miniaturního spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku. Tím je získávána informace o výšce povrchu nad vztažnou rovinou. Na obr. 4.6 je vyobrazen princip zmíněné optické metody [31, 35].



Obrázek 4.6 – Princip optické metody [18]

Optický profilometr MicroProf (Fries Research & Technology GmbH) je velmi univerzální a modulární měřicí přístroj, který je vhodný pro širokou škálu aplikací (obr. 4.7). Bez ohledu na to, co se plánuje měřit, ať už je to profil, drsnost povrchu nebo tloušťka vrstvy, tento systém je opravdu všestranný. A co je nejdůležitější, je velmi snadno použitelný, rozšiřitelný, lze ho automatizovat a poskytuje okamžité viditelné výsledky, což přináší nákladově efektivní provoz [18].



Obrázek 4.7 - Optický profilometr MicroProf FRT

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 MATERIÁL

Výchozím materiálem, pro zkoušky plastické deformace metodou podélného válcování za studena za účelem sledování vlivu technologických parametrů na topografii povrchu a to zejména v závislosti na úběru materiálu, bylo pět druhů plechů. Jednalo se o nelegovanou nízkouhlíkovou konstrukční ocel PN EN 10263-2:2004, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 5.1

Tabulka 5.1 – Chemické složení materiálu z nízkouhlíkové konstrukční oceli PN EN 10263-2:2004 v %
[25, 26, 32]

Fe	C	Mn	Si	P	S
99,6200	0,0228	0,1928	0,0117	0,0081	0,0053
Cr	V	Cu	Al	Co	B
0,0209	0,0014	0,0275	0,0562	0,0075	0,0004

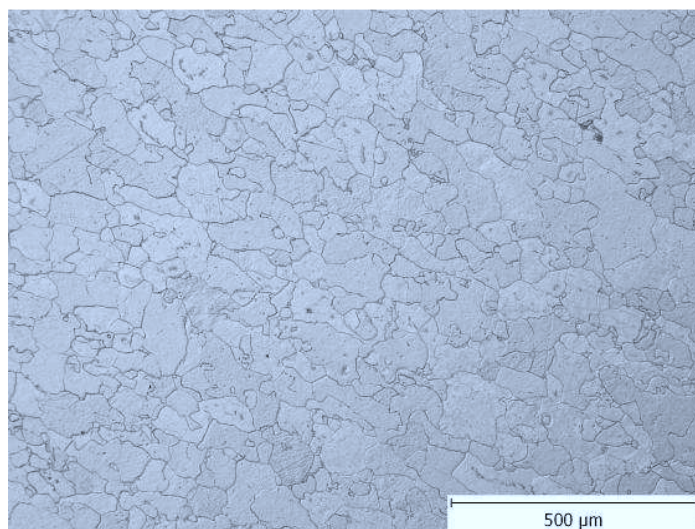
Chemická analýza byla provedena optickým emisním spektrometrem LECO GDS 760 (viz obr. 5.1) s buzením doutnavým výbojem [32].

Tento přístroj umožňuje kvantitativní chemickou analýzu kovů a slitin, založenou na měření a následném vyhodnocení intenzit vybraných spektrálních čar stanovovaných prvků. Jedná se o simulační přístroj, tj. stanovení všech prvků probíhá současně. Přístroj je osazen kanály pro stanovení 28 prvků: Mg, Al, Cu, B, Mo, Cd, Ni, Fe, Mn, Na, C, S, P, As, Si, Zn, Ti, Co, Ta, V, Cr, Pb, Sb, Bi, Sn, Nb, Zr a W [39].



Obrázek 5.1 – Spektrometr LECO GDS760A [39]

Na experimentálním materiálu byla provedena kromě chemických analýz také analýza metalografická. Metalografické výbrusy za účelem strukturní analýzy byly provedeny kolmo k podélné ose vzorků. Pro jejich pozorování byl použit invertovaný mikroskop pro odražené světlo GX51 s maximálním zvětšením 1000x. Pro ilustraci je na obr. 5.2 uvedena mikrostruktura materiálu z nízkouhlíkové oceli [32]. Všechny ilustrace metalografických výbrusů z nízkouhlíkové oceli jsou uvedeny v příloze 1.



Obrázek 5.2 – Metalografický výbrus z nízkouhlíkové oceli [32]

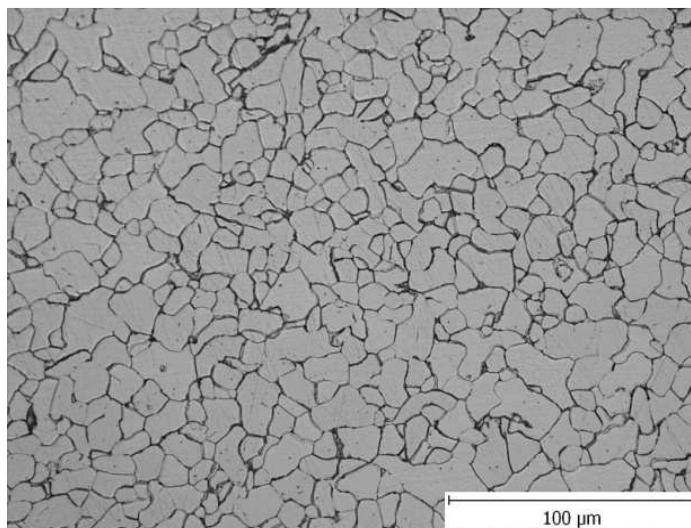
Pro malý obsah uhlíku mají nízkouhlíkové oceli převažující feritickou strukturu s velmi malým podílem karbidů, a proto se v přírodním a žíhaném stavu vyznačují nízkými pevnostními a vysokými plastickými vlastnostmi. V praxi se proto používají jako konstrukční materiály pro účely velmi i méně náročného tváření za studena. Je možné je využít na výrobu automobilových komponentů a motorových elektrotechnických ocelí [11, 13].

Druhým materiálem byla hlubokotažná ocel řady KOHAL o jakosti 697. U výrobce tohoto materiálu byla provedena analýza, která zahrnovala chemické složení (viz tab. 5.2), hodnocení mikročistoty, mikrostruktury a velikost zrna.

Tabulka 5.2 – Chemické složení materiálu z hlubokotažné oceli řady KOHAL o jakosti 697 v % [25, 32]

Fe	C	Mn	Si	P	S	Al	N ₂
99,6326	0,0370	0,2610	0,0070	0,0070	0,0070	0,0610	0,0031
Cu	Ni	Cr	As	Ti	V	Nb	Mo
0,0210	0,0090	0,0140	0,0010	0,0010	0,0010	0,0020	0,0020

Rozbor mikročistoty materiálu neprokázal výrazné znečištění nekovovými příměsemi. V materiálu byly identifikovány částice typu globulární oxid. Mikrostruktura materiálu plechů z hlubokotažné oceli je tvořena feritem, perlitem a cementitem (viz obr. 5.3). Feritické zrna je polyedrické, rovnoměrně rozložené po celém průřezu pozorovaného materiálu [32]. Ilustrace metalografických výbrusů z hlubokotažné oceli jsou opět uvedeny v příloze 2.



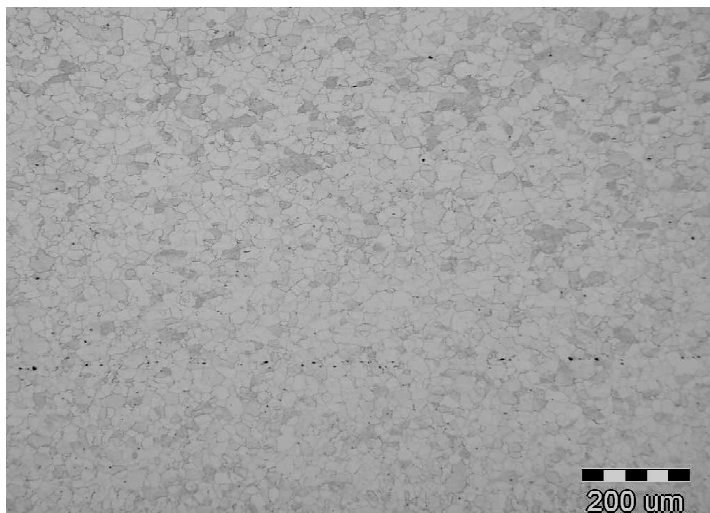
Obrázek 5.3 – Metalografický výbrus z hlubokotažné oceli [32]

Třetím materiálem byla IF ocel bez intersticií o jakosti 007. U výrobce tohoto materiálu byla provedena analýza, která zahrnovala chemické složení (viz tab. 5.3), hodnocení mikročistoty, mikrostruktury a velikost zrna.

Tabulka 5.3 – Chemické složení materiálu z IF oceli o jakosti 007 v %

Fe	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu
99,6303	0,0033	0,1130	0,0080	0,0100	0,0072	0,0310	0,0240
Ni	Cr	As	Ti	V	Nb	Mo	Co
0,0090	0,0150	0,0020	0,0610	0,0020	0,0020	0,0030	0,0030
Sn	Sb	Pb	Zn	Zr	B	Als	C_E
0,0050	0,0030	0,0030	0,0010	0,0020	0,0002	0,0300	0,0320

Rozbor mikročistoty materiálu neprokázal zvýšený výskyt nekovových příměsí. V materiálu byly identifikovány částice typu globulární oxid. Mikrostruktura vzorků z IF oceli se analyzovala po celém jejich průřezu a je tvořena feritem. Feritická mikrostruktura je rovnoměrná po celém průřezu (viz obr. 5.4). Feritické zrno je polyedrické a odpovídá velikosti G7 – G9 [41].



Obrázek 5.4 – Metalografický výbrus z IF oceli [42]

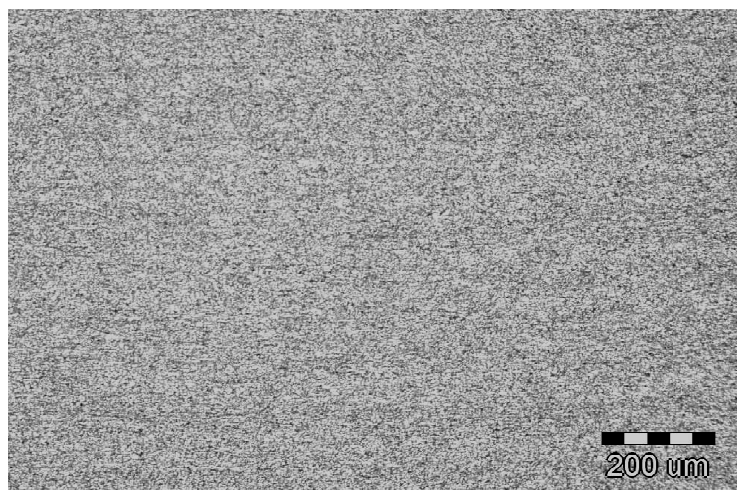
IF oceli se vyznačují vynikajícími hlubokotažnými vlastnostmi, vysokým součinitelem normované anizotropie r a odolnosti vůči stárnutí, která je předurčuje na kontinuální žárové pozinkování. Na druhé straně však tyto oceli jsou charakteristické nízkou pevností, což neumožňuje jejich použití pro aplikace vyžadující vyšší odolnost vůči porušování. Vyvážené chemické složení je velmi důležité pro dosažení požadovaných mechanických vlastností [36].

Dalším materiálem byla mikrolegovaná ocel o jakosti 676. U výrobce tohoto materiálu byla provedena analýza, která zahrnovala chemické složení (viz tab. 5.4), hodnocení mikročistoty, mikrostruktury a velikost zrna.

Tabulka 5.4 – Chemické složení materiálu z mikrolegované oceli o jakosti 676 v %

Fe	C	Mn	Si	P	S	Al
98,8929	0,0808	0,8650	0,0080	0,0100	0,0029	0,0340
Cu	Ni	Cr	As	Ti	V	Nb
0,0280	0,0130	0,0150	0,0010	0,0150	0,0020	0,0360
Mo	Co	Sn	Sb	Zr	B	Ca
0,0020	0,0040	0,0020	0,0020	0,0010	0,0002	0,0002

Rozbor mikročistoty materiálu neprokázal zvýšený výskyt nekovových příměsí. V materiálu byly identifikovány částice typu globulární oxid. Mikrostruktura vzorků z mikrolegované oceli se analyzovala po celém jejich průřezu a je tvořena feritem a perlitem. Zrno je převážně protáhlé v poměru 2:1 až 4:1 a je rovnoměrné po celém průřezu pozorovaného vzorku (viz obr. 5.5). Zrno odpovídá velikosti G12 – G13, ojediněle G14 [42].



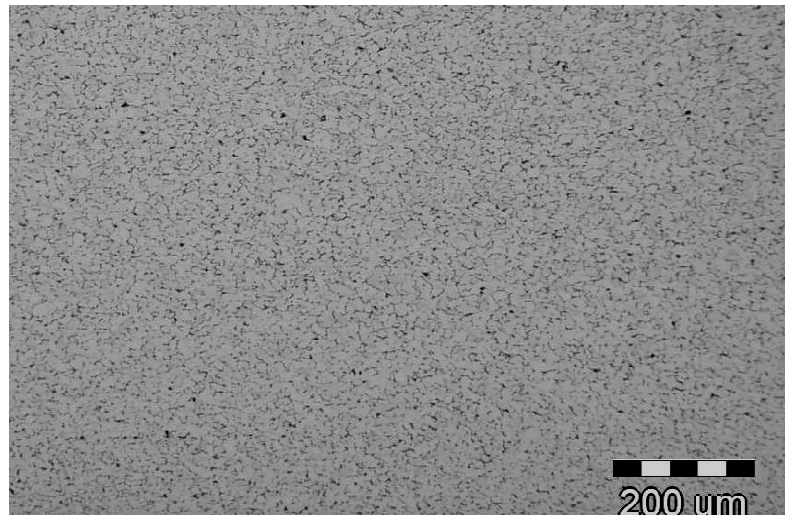
Obrázek 5.5 – Metalografický výbrus z mikrolegované oceli [42]

Pátým materiálem byla refosforizovaná ocel o jakosti 665. U výrobce tohoto materiálu byla provedena analýza, která zahrnovala chemické složení (viz tab. 5.5), hodnocení mikročistoty, mikrostruktury a velikost zrna.

Tabulka 5.5 – Chemické složení materiálu z refosforizované oceli o jakosti 665 v %

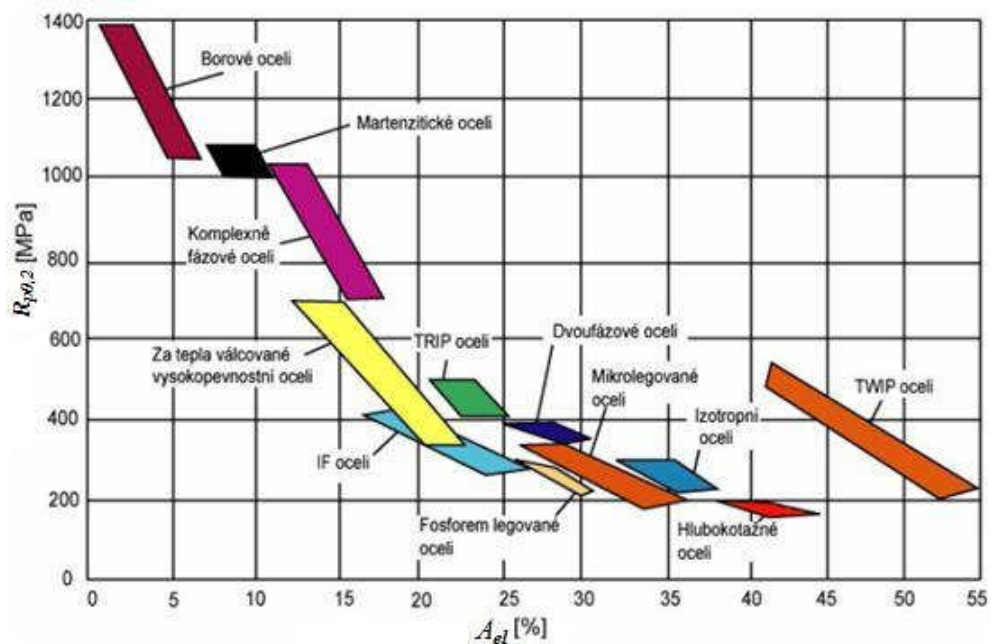
Fe	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu
	0,0480	0,1720	0,1860	0,0690	0,0048	0,0480	0,0270
Ni	Cr	As	Ti	V	Nb	Mo	Co
0,0100	0,0160	0,0010	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020
Sn	Sb	Pb	Zn	Zr	B	Als	C_E
0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,0002	0,0470	0,0830

Rozbor mikročistoty materiálu neprokázal zvýšený výskyt nekovových příměsí. V materiálu byly identifikovány částice typu globulární oxid. Mikrostruktura vzorků z refosforizované oceli se analyzovala po celém jejich průřezu a je tvořena feritem a perlitem. Mikrostruktura je rovnoměrná po celém průřezu vzorku (viz obr. 5.6). Perlit je jemnozrnější a velikost zrna odpovídá stupni G11 – G12 [42].



Obrázek 5.6 – Metalografický výbrus z refosforizované oceli [42]

Jde o materiály, u nichž je obecně žádoucí, aby vykazovaly současně co nejvyšší pevnostní i plastickou úroveň. Tyto vlastnosti je předurčují k použití pro nejrůznější automobilové komponenty, včetně karoserií. Podle typu dané oceli se jmenované parametry také liší. Závisí zejména na chemickém složení materiálu a na vlastním zpracování. Velmi důležitá je také co nejnížší hmotnost, protože tato má přímý dopad na spotřebu paliva a také na životní prostředí. Snižování hmotnosti karosérie je spojeno se zvyšováním pevnostních vlastností karosářských plechů, které musí zároveň vykazovat vysoké plastické vlastnosti za studena a dobrou svařitelnost. Ocelové plechy používané v automobilovém průmyslu pro výrobu karoserií a dveří jsou dodávány jednak ve svitcích po válcování za tepla a moření v tloušťkách $h = 1\text{--}2\text{ mm}$, jednak také ve svitcích po válcování za studena v tloušťkách $h \leq 0,7\text{ mm}$ [13]. Parametry mechanických vlastností ocelových plechů pro výrobu karosérie je uveden na obr 5.7.



Obrázek 5.7 – Parametry mechanických vlastností ocelových plechů pro automobilový průmysl [43]

Plechý z nízkouhlíkové oceli (které se vyskytují u dvoufázových ocelí, TRIP ocelí a vícefázových ocelí) a hlubokotažné oceli (které rovněž obsahují nízkouhlíkovou ocel) se využívají především pro výrobu karoserií, které jsou z větší části tvořeny materiály s $Rp_{0,2} = 180\text{--}300$ MPa. Proto musí karosářské plechy vykazovat především dobré plastické vlastnosti [43].

5.2 VYTVOŘENÍ VZORKŮ

Na základě znalosti parametrů laboratorní válcovací stolice DUO 210 SVa a Kvarto Q110 byl vytvořen plán experimentů pro vyprodukování vzorků z té které oceli. Plán vypadal následovně:

1. Tabule plechu z nízkouhlíkové oceli:
 - rozměr: 400 x 170 x 1,6 [mm] ($l \times b \times h$)
 - válcovací rychlost v_{roll} : 0,7 [m·s⁻¹]

Po nastříhání tabule plechu bylo vytvořeno celkem 5 vzorků, u kterých se požadovala tloušťka h_l znázorněná v tab. 5.6.

Tabulka 5.6 – Požadované tloušťky pro vzorky z nízkouhlíkové oceli

Vzorek	l_0 [mm]	b_0 [mm]	h_0 [mm]	h_l [mm]
0	72	33	1,6	-
1	72	33	1,6	1,2
2	72	33	1,6	1,1
3	72	33	1,6	1,0
4	72	33	1,6	0,8

2. Tabule plechu z hlubokotažné oceli:
 - rozměr: 4500 x 950 x 2,52 [mm] ($l \times b \times h$)
 - válcovací rychlost v_{roll} : 0,7; 1,0 [m·s⁻¹]

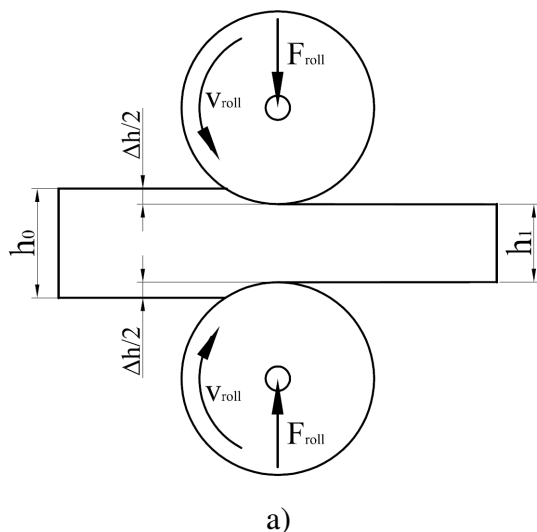
Po nastříhání tabule plechu bylo vytvořeno 200 vzorků, u kterých se požadovala tloušťka h_l a z toho bylo vybráno 6 vzorků, které jsou popsány v tab. 5.7.

Tabulka 5.7 – Požadované tloušťky pro vzorky z hlubokotažné oceli

Vzorek	l_0 [mm]	b_0 [mm]	h_0 [mm]	h_l [mm]
0	150	31	2,52	-
1	150	31	2,52	2,2
2	150	31	2,52	1,7
3	150	31	2,52	1,3
4	150	31	2,52	0,9
5	150	31	2,52	0,7

Působením plastické deformace při podélném válcování za studena (obr. 5.8a) na válcovací stolič DUO 210 SVa (obr. 5.8b) byly vyprodukovány čtyři provalky z nízkouhlíkové konstrukční oceli s různými úběry a s technologickými parametry uvedených v tab. 5.8, pět provalků z hlubokotažné oceli s různými úběry

s technologickými parametry při $v_{roll} = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, které jsou uvedené v tab. 5.9 a pět provalků z hlubokotažné oceli s různými úběry s technologickými parametry při $v_{roll} = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, které jsou uvedené v tab. 5.10.



Obrázek 5.8 – a) Princip deformace při podélném válcování, b) válcovací stolice DUO 210 SVA [22, 23]

Plechý z hlubokotažné oceli byly válcovány také na laboratorní válcovací stolici Q110 (obr. 5.9), která se nachází na VŠB-TUO na Katedře tváření materiálu a z oceli bylo vyprodukováno deset provalků s různými úběry s technologickými parametry při $v_{roll} = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, které jsou uvedené v tab. 5.11. Q110 je typu kvarto, bezstojanová, předepjatá prostřednictvím 4 hydraulických matic. Byla projektována pro válcování za studena i velmi tenkých pásků z vysoce pevných materiálů. Stavění válců je zatím ruční, a to s měřením pomocí lineárního snímače (přesnost 0,001 mm). Po zkušební fázi je plánováno zařazení hydraulického stavění s on-line regulací výšky válcovací mezery během průchodu.

Parametry Q110 jsou:

- jmenovitý průměr pracovního válce 62 mm,
- jmenovitý průměr opěrného válce 160 mm,
- délka těla válců 110 mm,
- pohon pracovních válců dvěma samostatnými střídavými motory s převodovkami NORD (instalovaný příkon 1,6 kW),
- konstantní válcovací rychlost $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.


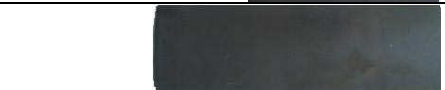



Počítačový program registruje krouticí momenty na obou vřetenech, válcovací sílu pod tlakovým šroubem (smykový snímač 150 kN), výšku válcovací mezery a 8 dalších parametrů spojených s předepjetím stolice. Především při válcování za studena se využívá ucelená sada digitálních měřidel (určování tloušťky provalků) [46].



Obrázek 5.9 – Laboratorní válcovací stolice Q110 [46]







Plechý 1A, 2A, 3A, 4A byly válcovací stolicí několikrát proválcovány při síle válcování F_{roll} od 65,55 kN do 90,07 kN, a to při válcovací rychlosti $v_{roll} = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzorek 0A je původní plech, který neprošel válcovací stolicí z důvodu vzájemného porovnání povrchu provalků s neproválcovaným plechem.

Tabulka 5.8 – Technologické parametry vytvořených vzorků z nízkouhlíkové oceli [24, 26]

Označení plechu	h_0 [mm]	h_1 [mm]	Δh [mm]	Foto
0A	1,6	1,6	-	
1A	1,6	1,2	0,4	
2A	1,6	1,1	0,5	
3A	1,6	1,0	0,6	
4A	1,6	0,8	0,8	







Plechý označené 1C, 2C, 3C, 4C, 5C byly válcovací stolicí DUO 210 SVa na Katedře tváření kovů na Hutnickej fakulte TU v Košiciach 2-7x proválcované při rychlosti válců $v_{roll} = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Čím větší byl požadován úběr Δh , tím vícekrát musel plech projít válcovací stolicí. Původní vzorek s označením 0C neprošel válcovací stolicí a byl využit pro komparaci se vzorky, které prošly válcovací stolicí [26].

Tabulka 5.9 – Parametry vyprodukovaných vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [26]

Označení plechu	$h_0[\text{mm}]$	$h_1[\text{mm}]$	$\Delta h[\text{mm}]$	Foto
0C	2,52	-	-	
1C	2,52	2,14	0,38	
2C	2,52	1,57	0,96	
3C	2,54	1,27	1,27	
4C	2,52	0,96	1,56	
5C	2,52	0,79	1,73	









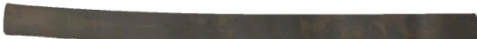


Plechý označené 1D, 2D, 3D, 4D, 5D byly válcovací stolicí DUO 210 SVa na Katedře tváření kovů na Hutnickej fakulte TU v Košiciach 1-11x proválcované při rychlosti válců $v_{roll} = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Opět čím větší byl požadován úběr Δh , tím vícekrát musel plech projít válcovací stolicí. Původní vzorek s označením 0D, neprošel válcovací stolicí a byl využit pro komparaci se vzorky, které prošly válcovací stolicí.

Tabulka 5.10 – Parametry vyprodukovaných vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Označení plechu	$h_0[\text{mm}]$	$h_1[\text{mm}]$	$\Delta h[\text{mm}]$	Foto
0D	2,52	-	-	
1D	2,52	2,21	0,31	
2D	2,52	1,67	0,85	
3D	2,52	1,38	1,14	
4D	2,52	0,87	1,65	
5D	2,53	0,74	1,79	

Na válcovací stoličce Q110 bylo vyprodukováno celkem 10 vývalků s označením 1E, 2E, 3E, 4E, 5E, 6E, 7E, 8E, 9E, 10E, které byly 1-18x proválcovány při rychlosti válců $v_{roll} = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabulka 5.11 – Parametry vyprodukovaných vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Označení plechu	$h_0[\text{mm}]$	$h_1[\text{mm}]$	$\Delta h[\text{mm}]$	Foto
0E	2,52	-	-	
1E	2,50	2,25	0,25	
2E	2,50	1,94	0,57	
3E	2,49	1,74	0,75	
4E	2,49	1,54	0,94	
5E	2,51	1,31	1,20	
6E	2,46	1,11	1,35	
7E	2,48	0,91	1,57	
8E	2,48	0,83	1,65	
9E	2,47	0,75	1,72	
10E	2,49	0,51	1,98	

Jelikož průměry pracovních a opěrných válců jsou příliš malé, byly výsledné plechy vlnité, viz tab. 5.11. Bylo velmi obtížné z vývalků získat tahové zkoušky, a proto pro další experimenty nebyla válcovací stolice Q110 využita.

5.3 MĚŘENÍ VÁLCOVACÍ SÍLY

Rozvoj technologie válcování, zavedení automatizačních prvků do této technologie a stále zvyšování požadavků na kvalitu vývalků si vyžaduje exaktní metody měření hlavních parametrů. Potřeba dokonalého měření a zavedení automatizační techniky je podmíněná zvyšováním válcovacích rychlostí, zvyšováním výkonů válcovacích zařízení a snahou snížit zmetkovitost a spotřebu energie. Jedním z nejdůležitějších energosilových parametrů je válcovací síla F_{roll} . Její spolehlivé, přesné a rychlé měření zabezpečuje plynulý proces válcování [11].

Síla při válcování se definuje jako vertikální složka výsledné přilnuté síly válcovaného kovu na pracovní válec [28]. V tomto případě se pohybovala u nízkouhlíkové oceli od 65,55 kN do 90,07 kN a u vzorků vyprodukovaných válcovací stolicí Q110 z hlubokotažné oceli, které jsou označeny 1E-10E, od 18,61 kN do 242,26 kN. Uvedené hodnoty se vypočetly podle vzorce

$$F_{roll} = R_{p0,2} \cdot S_h \cdot Q_{Froll} \quad , \quad (5.1)$$

kde S_h je horizontální průmět stykové plochy provačku s pracovní částí válce a vypočítá se následovně:

$$S_h = l_d \cdot b_s. \quad (5.2)$$

Tvářecí faktor Q_{Froll} lze charakterizovat vztahem

$$Q_{Froll} = \frac{l_d}{h_s} = \frac{2 \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}}{h_1 + h_0}. \quad (5.3)$$

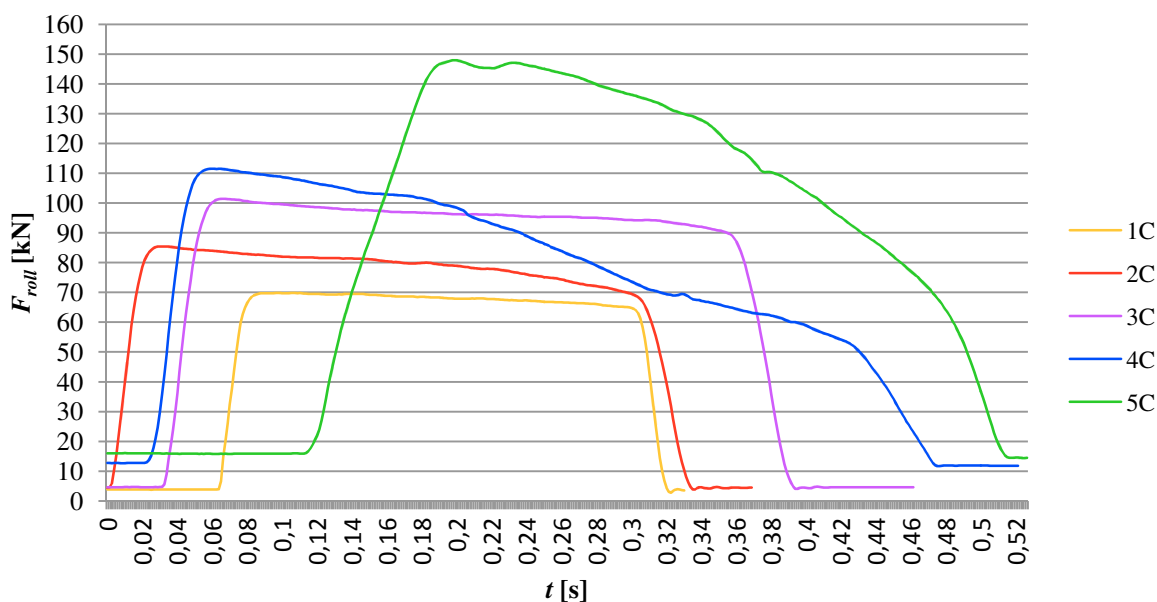
Charakterizuje vliv středního napětí působícího na stykové ploše válcovaného kovu s válcem v pásmu deformace na velikost válcovací síly. Válcovací faktor je integrovaný „charakterizátor“ intenzity namáhání materiálu s dopadem na výkon válcovny (poměr hmotnosti zpracovaného materiálu k potřebnému času), ekonomiku procesu (poměr změny k hmotnosti zpracovaného materiálu), a proto také na válcovací rychlost v_{roll} [26].

Válcovací síla na válcovací stolici DUO 210 SVa byla u hlubokotažné oceli změřena kovovými odporovými tenzometry (viz obr. 5.10), které byly při válcování plechů upevněny na této stolici [32].



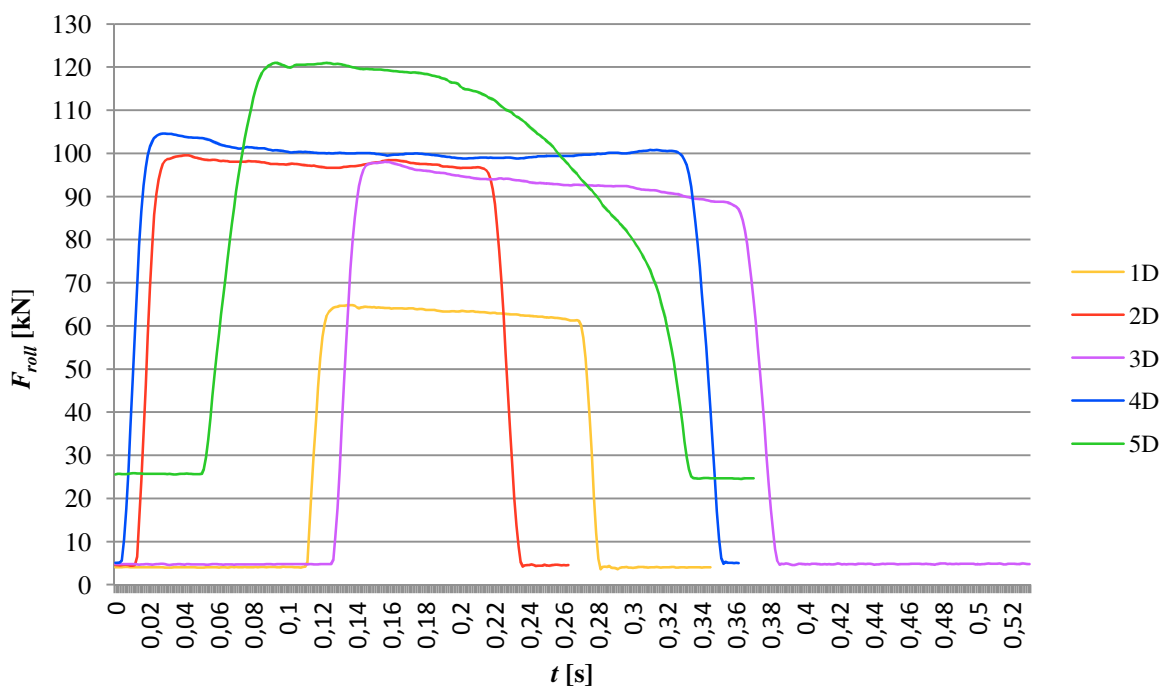
Obrázek 5.10 – Detail umístění tenzometrů na válcovací stolici [32]

Válcovací síla byla měřena při válcovací rychlosti $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz obr. 5.11) u všech plechů z hlubokotažné oceli, které jsou označeny 1C-5C, se válcovací síla pohybovala od 67,9 kN do 145,1 kN [32].



Obrázek 5.11 – Grafické znázornění průběhu válcovací síly v čase při válcovací rychlosti $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [32]

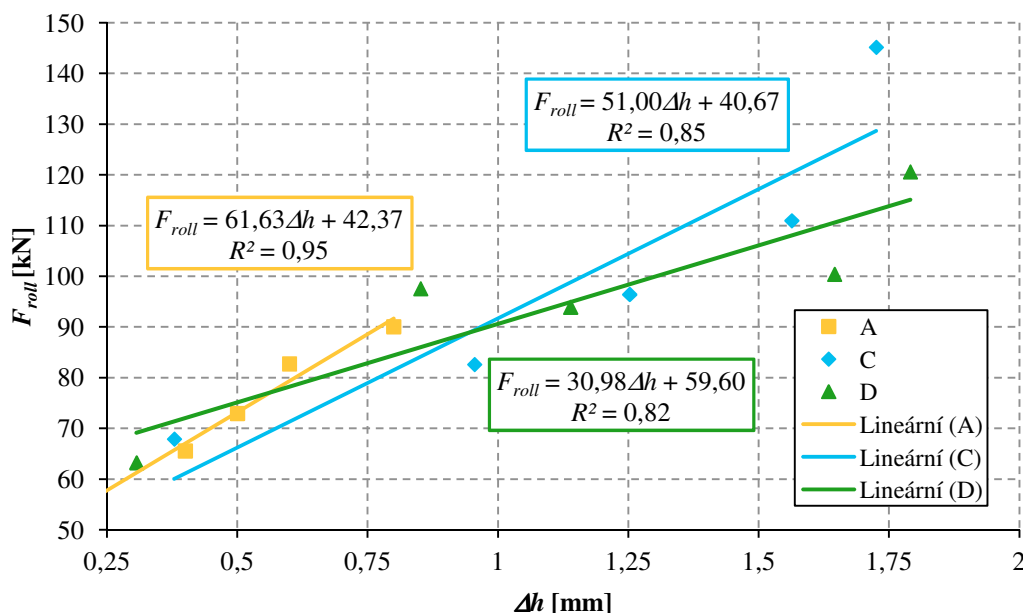
U plechů s označením 1D-6D byla rovněž měřena válcovací síla při válcovací rychlosti $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (viz obr. 5.12), která se pohybovala od 63,2 kN do 120,6 kN.



Obrázek 5.12 – Grafické znázornění průběhu válcovací síly v čase při válcovací rychlosti $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Čím větší úběr se požaduje, tím větší bude válcovací síla, a také bude hladší povrch daného provalku, jak je graficky znázorněno v obr. 5.13 [32]. Tato vazba platí u všech

experimentálních plechů, mimo plechu z hlubokotažné oceli 2C. U tohoto plechu byla zapotřebí větší válcovací síla než u plechu 3C.



Obrázek 5.13 – Vazba mezi úběrem Δh a válcovací silou F_{roll} pro DUO 210 SVa

Na obr. 5.13 je patrný rozdíl mezi průběhem zobrazující závislost úběru a válcovací síly u nízkouhlíkové oceli a průběhem pro hlubokotažnou ocel. Tento rozdíl je dán odlišným počtem úběrů a jeho hodnot, které nebyly u nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli totožné [32]. V grafu jsou rovněž znázorněny lineární regrese s hodnotou spolehlivosti R^2 . Lineární regrese je proložení několika bodů v grafu takovou přímkou, aby součet druhých mocnin odchylek jednotlivých bodů od přímky byl minimální. Hodnota spolehlivosti R^2 je v rozmezí od 0,82-0,95 tzn., že se přibližují dokonalé korelaci, tj. mezi odhadem a skutečnými hodnotami technologických parametrů není téměř žádný rozdíl.

5.4 ZKOUŠKY TAHEM

Zkoušky tahem byly provedeny za okolní teploty na vzorcích dodaných nelegovaných ocelových plechů třídy 11 v různém stavu deformace. Předmětem bylo získání všech relevantních veličin, s ohledem na dispozici materiálu.

Z dodaných vzorků oceli byla vyrobena standardizovaná zkušební tělesa typu 1 a 2, v souladu s ČSN EN ISO 6892-1. Ve všech případech byla dodržena min. délka $l_c = 50$ mm. Zkoušky byly provedeny dle výše uvedeného standardu, s použitím ověřeného 100 kN elektromechanického trhacího stroje, vybaveného extensometrem tř. 1. Výsledky zkoušek tahem uvádí následující tab. 5.12.

Tabulka 5.12 – Výsledky zkoušek tahem

Vzorek	$R_{p0,2(eH)}^*$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{el} [%]	A_{elgt} [%]	A_{elt} [%]	n	K
0C	274*	356	35,4	23,1	38	0,077	304,9
1C	452	476	13,0	3,69	12,0	0,012	466,4
2C	600	603	2,9	0,3	0,3	nestanoveno	
3C	680	682	1,2	0,3	0,4		
4C	682	684	1,0	0,5	0,4		
5C	724	727	1,4	0,5	0,4		
0D	294*	357	36,6	21,7	35,8	0,055	337,8
1D	427*	451	16,4	4,5	15,3	0,0119	431,1
2D	590	591	3,5	0,5	0,8	nenastaveno	
3D	640	642	2,4	0,4	0,4		
4D	780	780	0,4	0,4	1,7		
5D	720	722	0,9	0,4	0,4		
1E	414	452	13,9	3,9	12,8	0,021	442,5
2E	484	514	9,8	1,7	7,7	0,009	505,2
3E	537	550	4,8	1,1	5,0	0,003	547,4
4E	528	571	4,4	1,6	5,4	0,015	543,4
5E	603	618	2,2	0,8	3,2	nestanoveno	
6E	649	649	1,5	0,5	0,5		
7E	665	665	1,7	0,6	0,6		
8E	711	711	0,5	0,6	1,7		
9E	742	742	1,4	0,5	0,5		
10E	733	733	0,3	0,4	0,4		

*pozn.: *stanoveno jako výrazná mez kluzu R_{eH}

Hodnocené vzorky vykazují chování deformačně zpevněných plechů tvářením za studena. V případě vzorků s vysokou mírou pro tváření dochází ke značnému poklesu sledovaných tažností a v podstatě nebylo možné detekovat deformaci na úrovni 0,2 %, což je deformace pro výpočet smluvní meze kluzu. Z tohoto důvodu dochází u sérii 2C až 5C, 2D až 5D, 6E až 10E k jevu, kdy se očekávaná mez kluzu rovná mezi pevností. U těchto sérií je sledovaná tažnost z hlediska praktického uplatnění materiálu na spekulativní úrovni.

Uvedený exponent deformačního zpevnění n a koeficient K popisuje vztah mezi napětím a deformací v oblasti plastické deformace (oblast zpevnění) [41]. Pro popis

přetvárného odporu většiny tvárných kovů je velmi často používána zejména Hollomon-Ludwikova aproximace:

$$\sigma_i = K \cdot \varepsilon_i^n \quad (5.4)$$

σ_i kde σ je napětí v MPa [48], ε_i je bezrozměrná deformace, K , n jsou materiálové konstanty popisující parabolický průběh deformační křivky v oblasti plastické deformace (jedná se o analogii popisu Hookeova zákona pro lineární oblast křivky).

Z výše uvedené specifikace plyne, že s rostoucí hodnotou exponentu i koeficientu zpevnění roste schopnost materiálu k deformačnímu zpevnění a de facto i zvýšená schopnost absorpce deformační energie, což je jednou z popisných charakteristik plasticity materiálu. Ze stanovených výsledků plyne, že s rostoucím stupněm přetvoření oba parametry klesají

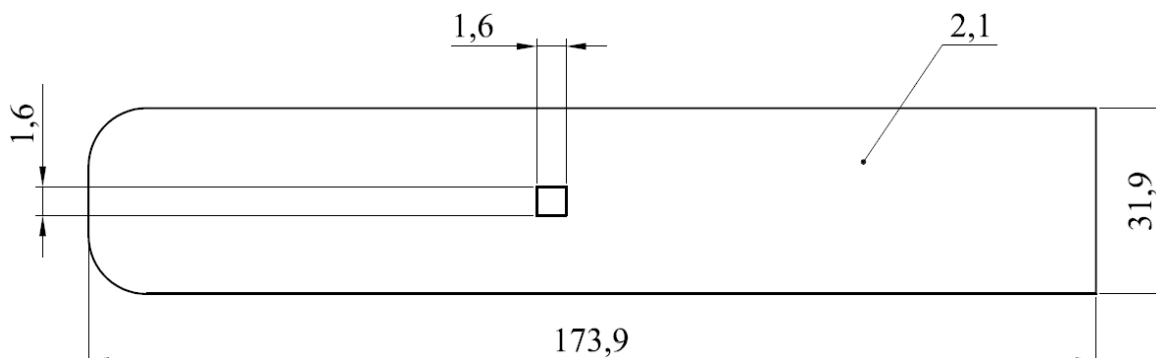
Stanovení exponentu zpevnění n bylo možné provést jen u těch vzorků, u kterých byla pozorována tažnost A_{elt} alespoň 5 %. V ostatních případech by tohle stanovení bylo bezpředmětné, neboť materiál nevykazoval relevantní zpevnění v oblasti plastické deformace [42]. V příloze 3 jsou uvedeny diagramy provedených zkoušek tahem u materiálu označeným „C“.

5.5 MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU

Měření a hodnocení topografie povrchu představuje samostatnou oblast metrologie. Speciální metodiky i měřicí prostředky umožní získání potřebných údajů pro charakteristiku kvality kontrolovaného povrchu [16].

I když jsou postupy měření a hodnocení topografie povrchu dlouhodobě normovány, stále se vyvíjejí, zpřesňují a doplňují. Cílem těchto prací je zajistit v maximální míře objektivní hodnocení profilu povrchu ve vztahu k jeho funkci. Přitom jde nejen o zjištění stavu připraveného povrchu, ale i o predikci případných změn funkční způsobilosti v průběhu provozu. Základem hodnocení povrchu jsou měřené parametry. Standardně jsou parametry profilu povrchu rozděleny do tří skupin podle hodnocení nerovností povrchu: výškové parametry, délkové parametry a hybridní parametry [16].

Výškové parametry, které jsou definovány v ose Z , jsou určeny výškami výstupků a prohlubní nebo jejich kombinacemi [16]. U plechů z hlubokotažné oceli, které byly válcované za studena, byly měřeny výškové parametry topografie povrchu prostřednictvím drsnoměru SurfTest SJ401 a optického profilometru MicroProf FRT (viz kapitola 4.2.1 a 4.2.2). U plechů z nízkouhlíkové oceli byly měřeny výškové parametry topografie povrchu pouze pomocí optického profilometru MicroProf FRT. Vždy se jednalo o měření plochy o rozměru 1,6 x 1,6 mm (viz obr. 5.14).



Obrázek 5.14 – Schéma vzorku 1C s úběrem 0,4 mm s vyznačenou měřenou oblastí 1,6x1,6 mm

5.5.1 Výsledky z drsnoměru SurfTest SJ 401

Výsledné výškové parametry topografie povrchu byly stanoveny na základě vertikálního posunu dotykového hrotu způsobeného přejížděním hrotu po měřeném povrchu. Měřicí hrot se pohyboval po povrchu v rozsahu 1,6 mm snímané délky s rychlostí $0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ při posuvu 0,1 mm. Celkem bylo změřeno 16 linií ve směru válcování a 16 linií kolmých na směr válcování na jednom vzorku.

Nejčastěji využíván je parametr Ra (střední aritmetická odchylka profilu) především při měření dokončených povrchů. Tento parametr je vhodný pro řízení nebo regulaci výrobního zařízení. Změní-li se hodnota Ra , je to zpravidla výsledkem změny podmínek procesu. Méně využívaným parametrem ve všeobecném strojírenství je parametr Rq (střední kvadratická odchylka profilu). Hodnota Rq je citlivější na nežádoucí výstupky a prohlubně kontrolovaného povrchu, a proto zpravidla ukazuje vyšší hodnoty než Ra . Z toho důvodu je tento parametr využíván v optickém průmyslu díky své schopnosti zjišťovat nežádoucí (rušivé) výstupky a prohlubně. U vysoce namáhaných součástí je významný parametr Rz , který vyjadřuje průměrnou hodnotu ze všech celkových výšek profilu (tzn. součet nejvyšších výstupků a nejnižších prohlubní profilu v rozsahu vyhodnocované délky) změřených na jednotlivých základních délkách [16].

Informace o nerovnostech povrchů plechů z hlubokotažné oceli vytvořených podélným válcováním za studena jsou pro jednotlivé úběry Δh a pro výše uvedené výškové parametry topografie zapsány v tab. 5.13, 5.14 a 5.15.

Tabulka 5.13 – Příslušné výškové parametry hodnocení topografie povrchu u jednotlivých vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Označení plechu	$\Delta h[\text{mm}]$	$Ra[\mu\text{m}]$	$Rq[\mu\text{m}]$	$Rz[\mu\text{m}]$
0C	-	1,55	1,94	9,92
1C	0,38	0,84	1,09	6,22
2C	0,96	0,19	0,26	1,90
3C	1,27	0,20	0,29	2,59
4C	1,56	0,19	0,25	1,92
5C	1,73	0,13	0,19	1,62

Tabulka 5.14 – Příslušné výškové parametry hodnocení topografie povrchu u jednotlivých vzorků z hlubokotažné oceli při $v_{roll} = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Označení plechu	$\Delta h[\text{mm}]$	$Ra[\mu\text{m}]$	$Rq[\mu\text{m}]$	$Rz[\mu\text{m}]$
0D	-	1,36	1,70	8,54
1D	0,31	0,73	0,94	5,77
2D	0,85	0,49	0,65	4,32
3D	1,14	0,56	0,72	4,52
4D	1,65	0,20	0,29	2,42
5D	1,79	0,22	0,29	2,36

Tabulka 5.15 – Příslušné výškové parametry hodnocení topografie povrchu u jednotlivých vzorků vyprodukovaných válcovací stolicí Q110 z hlubokotažné oceli

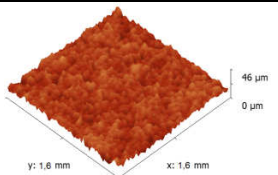
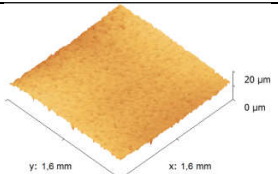
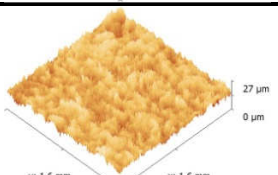
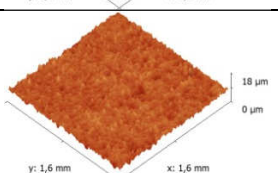
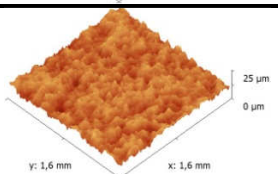
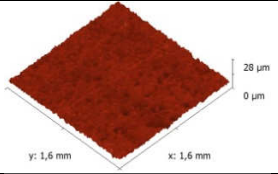
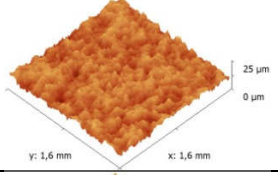
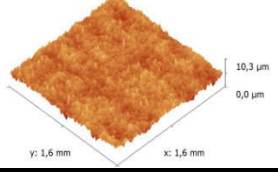
Označení plechu	$\Delta h[\text{mm}]$	$Ra[\mu\text{m}]$	$Rq[\mu\text{m}]$	$Rz[\mu\text{m}]$
0E	-	1,59	1,97	8,79
1E	0,25	0,40	0,52	2,74
2E	0,57	0,33	0,41	1,88
3E	0,75	0,29	0,36	1,67
4E	0,94	0,24	0,29	1,36
5E	1,20	0,23	0,29	1,36
6E	1,35	0,26	0,32	1,55
7E	1,57	0,20	0,26	1,30
8E	1,65	0,25	0,30	1,42
9E	1,72	0,23	0,28	1,34
10E	1,98	0,23	0,29	1,42

5.5.2 Výsledky z optického profilometru MicroProf FRT

Topografie povrchu vzorků byla měřena optickým profilometrem MicroProf FRT tak, že vzorky byly umístěny na skenovacím stolku a nepohyblivým senzorem byla snímána oblast plochy o rozměru $1,6 \times 1,6 \text{ mm}$ při kroku $3 \mu\text{m}$ a frekvenci 1 kHz . Pomocí optického profilometru byla tedy získána 3D topografie povrchu u měřených oblastí.

Data naměřená optickým profilometrem MicroProf FRT byla analyzována v programu Gwyddion [47]. Pomocí tohoto programu byly získány údaje o nerovnosti povrchu plechů v proměřených oblastech. Bylo získáno detailní zobrazení všech proměřených 3D oblastí u nízkoúhlíkové a hlubokotažné oceli, které je v příloze 4. Pro komparaci jsou v tab. 5.16 zobrazeny 3D oblasti neproválcovaného povrchu s proválcovaným.

Tabulka 5.16 – Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli

<i>Materiál vzorku</i>	<i>Označení plechu</i>	<i>Δh[mm]</i>	<i>3D topografie povrchu</i>
nízkouhlíková ocel	0A	-	
	1A	0,4	
hlubokotažná ocel vyprodukovaná při $v_{roll} = 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	0C	-	
	1C	0,38	
hlubokotažná ocel vyprodukovaná při $v_{roll} = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	0D	-	
	1D	0,31	
hlubokotažná ocel vyprodukovaná válcovací stolicí Q110	0E	-	
	1E	0,25	

Série 3D zobrazení stejného povrchu umožňuje posouzení změny jeho topografie v závislosti na velikosti úběru Δh . Informace o nerovnostech povrchů vytvořených podélným válcováním za studena pro jednotlivé úběry Δh jsou: střední aritmetická odchylka profilu povrchu Ra (nejužívanější parametr 2D), střední kvadratická odchylka profilu Rq a největší výška nerovnosti profilu Rz uvedeny v tab. 5.17 [6].

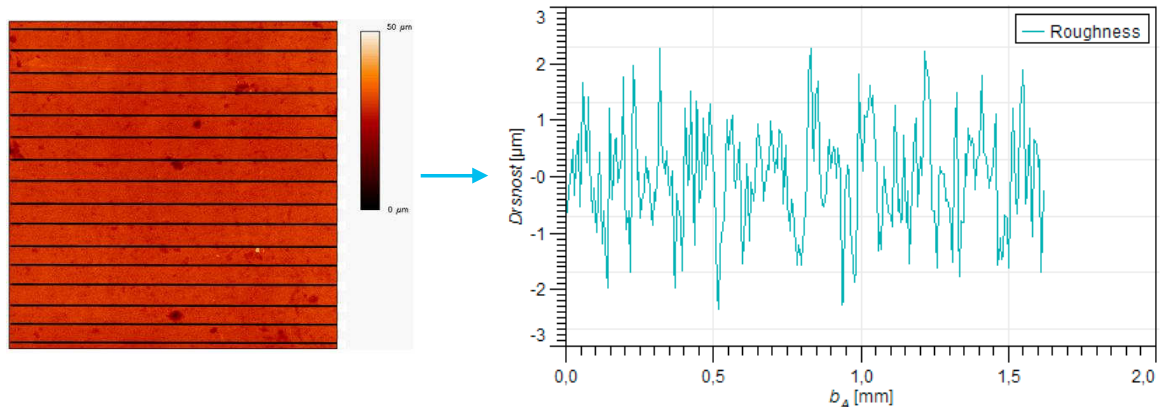
Tabulka 5.17 - Příslušné normované parametry hodnocení topografie povrchu u jednotlivých vzorků z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli

Materiál vzorku	Označení plechu	Δh[mm]	Ra[μm]	Rq[μm]	Rz[μm]
nízkouhlíková ocel	0A	-	0,71	0,97	7,42
	1A	0,4	0,37	0,52	3,39
	2A	0,5	0,43	0,56	3,77
	3A	0,6	0,21	0,28	2,05
	4A	0,8	0,12	0,17	1,60
hlubokotažná ocel vyprodukovaná při $v_{roll} = 0,7$ $m \cdot s^{-1}$	0C	-	1,07	1,38	6,94
	1C	0,38	0,76	0,97	4,66
	2C	0,96	0,73	0,94	5,12
	3C	1,27	0,43	0,55	3,02
	4C	1,56	0,61	0,81	4,74
	5C	1,73	0,48	0,61	3,16
hlubokotažná ocel vyprodukovaná při $v_{roll} = 1,0$ $m \cdot s^{-1}$	0D	-	1,11	1,40	6,19
	1D	0,31	0,73	0,94	4,60
	2D	0,85	0,68	0,88	4,89
	3D	1,14	0,96	1,21	6,20
	4D	1,65	0,40	0,54	3,19
	5D	1,79	0,62	0,80	4,12
hlubokotažná ocel vyprodukovaná válcovací stolici Q110	0E	-	1,11	1,40	6,19
	1E	0,25	0,50	0,65	3,54
	2E	0,57	0,44	0,57	2,94
	3E	0,75	0,45	0,58	2,94
	4E	0,94	0,44	0,56	2,87
	5E	1,20	0,39	0,51	2,84
	6E	1,35	0,39	0,50	2,50
	7E	1,57	0,26	0,34	1,71
	8E	1,65	0,41	0,53	2,69
	9E	1,72	0,43	0,55	2,85
	10E	1,98	0,40	0,50	2,68

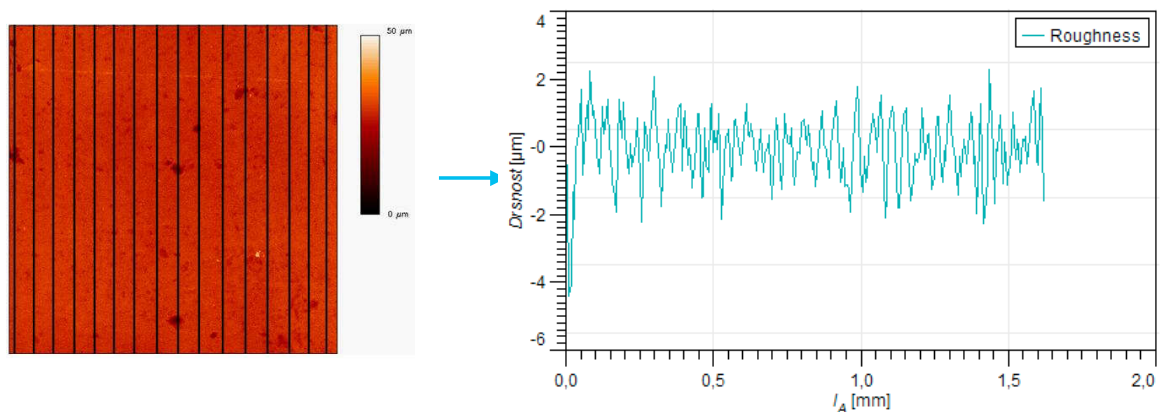
Drsnost povrchu v implicitním podání je vyjádřena následovně: $Ra = f(F_{roll}, Q_{Froll}, v_{roll}, n_{roll})$. Je nutno hledat vazby mezi technologií, materiálem a výslednou kvalitou povrchu [32].

V programu Gwyddion byly analyzovány proměřené oblasti u jednotlivých vzorků z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli (viz příloha 5 a 6). Protože v programu Gwyddion není možné získat parametry topografie povrchu z celých ploch 2D vybraných oblastí, byly výškové parametry na těchto oblastech analyzovány pomocí linie. Jednalo se o 16 ekvidistantních měřicích liniích položených ve směru válcování na úrovních b_{A1} až b_{A16} o délce 1,6 mm. A 16 ekvidistantních měřicích liniích položených kolmo na směr válcování na úrovních l_{A1} až l_{A16} rovněž o délce 1,6 mm. Z každé měřicí linie byl získán

signál, který v sobě nese informace o distribuci výškových fluktuací povrchu (obr. 5.15 a obr. 5.16).

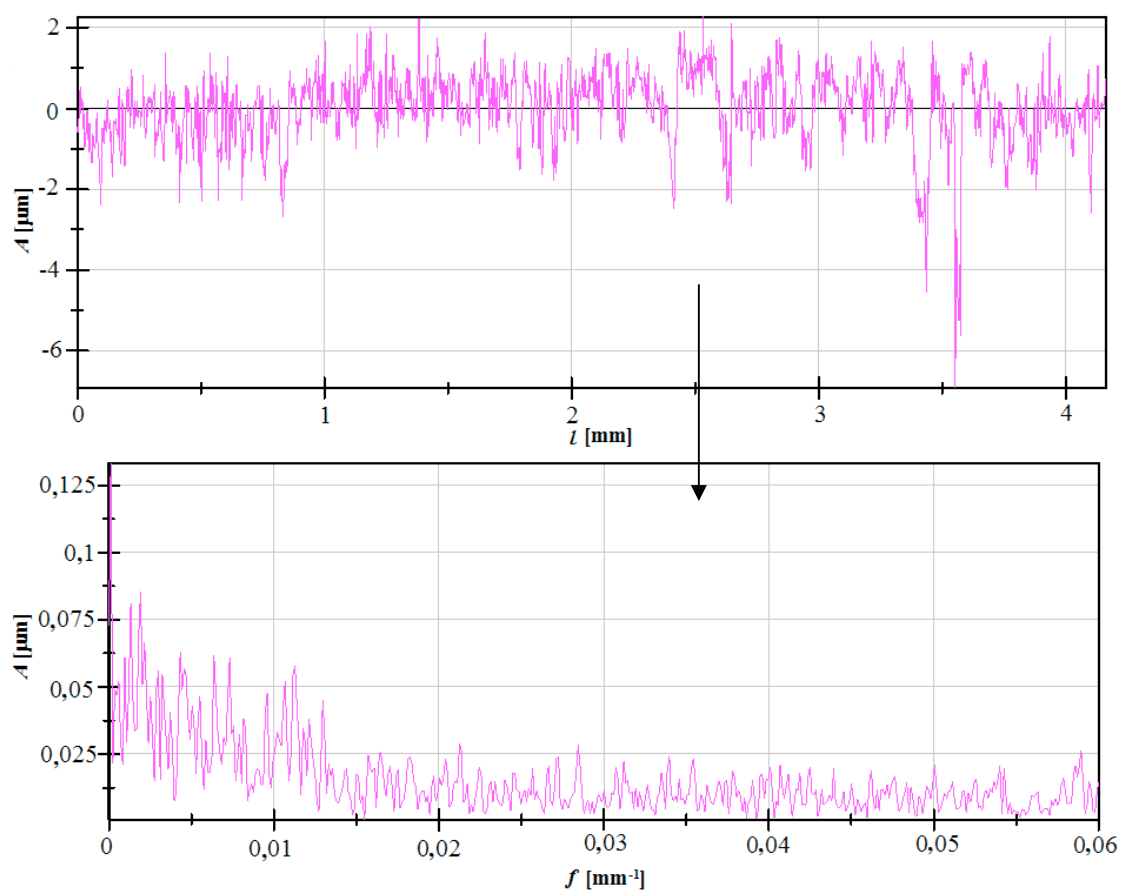


Obrázek 5.15 - Proměřená oblast na vzorku s úběrem 0,38 mm v 16-ti ekvidistantních liniích ve směru válcování s distancí 0,1 mm, z kterých byly získány signály nerovností povrchu



Obrázek 5.16 - Proměřená oblast na vzorku s úběrem 0,38 mm v 16-ti ekvidistantních liniích kolmých na směr válcování s distancí 0,1 mm, z kterých byly získány signály nerovností povrchu

V programu DIAdem byly tyto signály následně převedeny pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) na amplitudově-frekvenční spektra (obr. 5.17). Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform, zkratkou FFT) je efektivní algoritmus pro spočítání diskrétní Fourierovy transformace (DFT) a její inverze. Fourierova transformace je matematická metoda, která je použitelná k analyzování obrazu (signálu). Jde o vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů, tj. funkcí sin a cos, obecně tedy funkce komplexní exponenciály. Rychlá Fourierova transformace slouží pro převod signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční (kmitočtové). FFT je velmi důležitá v mnoha oblastech, od digitálního zpracování signálu a řešení parciálních diferenciálních rovnic až po rychlé násobení velkých celých čísel. Diskrétní Fourierova transformace našla velké uplatnění zejména s rozvojem výpočetní techniky [29].



Obrázek 5.17 – Převodění signálů pomocí FFT na amplitudově-frekvenční spektrum

Pomocí FFT je možno hledat v daných spektrech oblast drsnosti. Drsnost se objevuje v oblasti vysokých frekvencí s malými amplitudami povrchových nerovností, jak vyplývá z obr. 5.17.

6 VÝSLEDKY A DISKUSE

6.1 ZÁVISLOST KVALITY POVRCHU NA VLASTNOSTECH VÁLCOVANÉHO MATERIÁLU

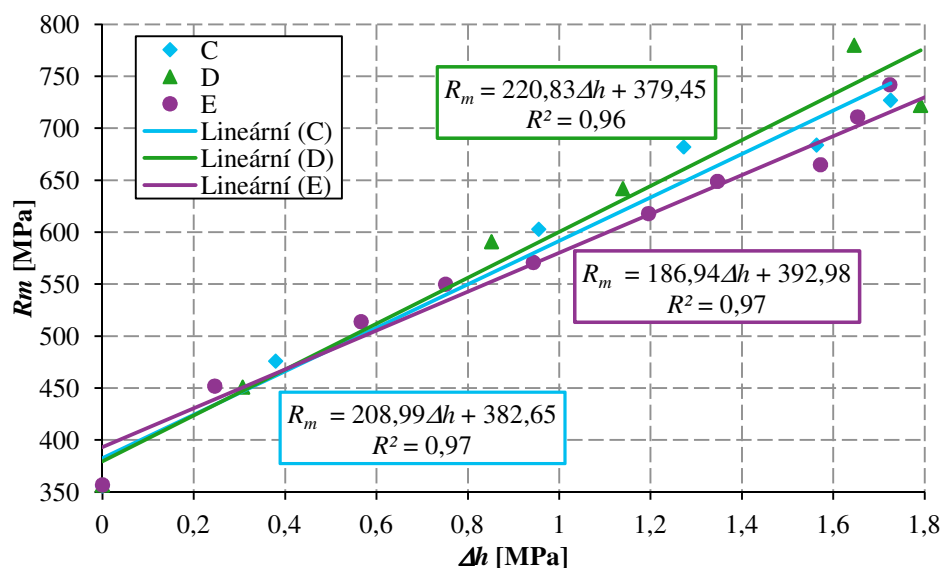
Pro správné a hospodárné využití ocelových materiálů musí být dobře známy jejich vlastnosti. Aby materiál mohl odolávat různému namáhání, musí mít určité mechanické vlastnosti jako pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost aj.

Tvářitelnost ocelí za studena obecně vyjadřuje schopnost odolávat plastickým deformacím při válcování za studena, aniž se na hranách pásů vyskytnou hlubší trhliny. Obecně lze tvářitelnost ocelí za studena hodnotit dosažením velikostí mezní plastické deformace do vzniku trhlin nebo lomu.

K hodnocení tvářitelnosti ocelí za studena se používá řada laboratorních a technologických zkoušek. Z laboratorních zkoušek je to nejčastěji tahová zkouška. Ale je třeba dodat, že ne všechny kritéria, resp. výstupy ze zkoušky jsou pro různorodou škálu ocelí, tzn., že ne všechny výstupy mají obecnou platnost.

Prostřednictvím tahových zkoušek (viz kapitola 4.4) ocelových materiálů byly získány hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, pevnosti v tahu R_m , tažnosti A_{el} , skutečné tažnosti A_{et} , Youngova modulu pružnosti v tahu E .

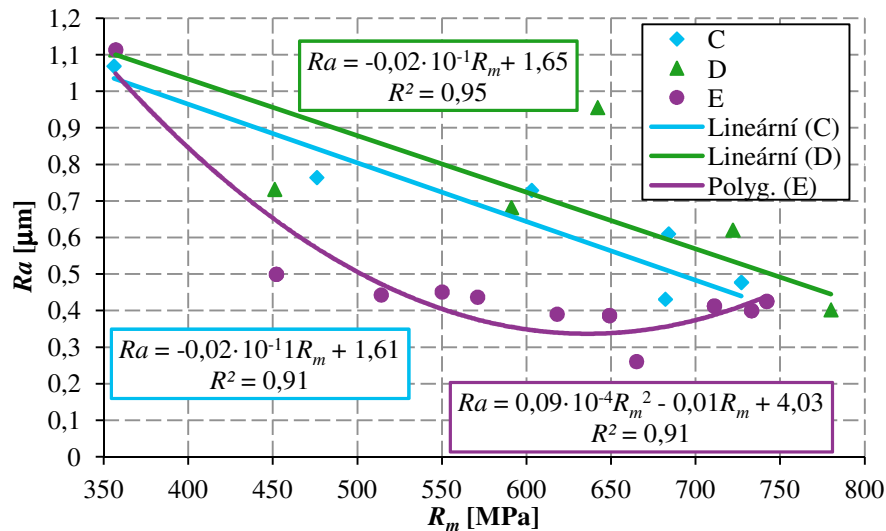
Čím větší úběr se požaduje, tím větší bude smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a pevnosti v tahu R_m (obr. 6.1) a také bude hladší povrch daného provačku.



Obrázek 6.1 – Grafické znázornění závislosti pevnosti v tahu na absolutním úběru u hlubokotažné oceli

V grafu jsou rovněž znázorněny lineární regrese s hodnotou spolehlivosti R^2 . Jak bylo zmíněno v kapitole 5.3, lineární regrese je proložení několika bodů v grafu takovou přímkou, aby součet druhých mocnin odchylek jednotlivých bodů od přímky byl minimální. Hodnota spolehlivosti R^2 je v rozmezí od 0,96 do 0,97 tzn., že se přibližují dokonalé korelaci, tj. mezi odhadem a skutečnými hodnotami technologických parametrů není téměř žádný rozdíl.

Teoreticky by mělo rovněž platit, čím bude větší smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a pevnosti v tahu R_m , tak bude hladší povrch daného provalku. Z praktického hlediska tomu však tak být nemusí, jak je graficky znázorněno v obr. 6.2.



Obrázek 6.2 –Vliv pevnosti v tahu na střední aritmetické odchyly profilu povrchu u hlubokotažné oceli

Grafické znázornění průběhů v obr. 6.2 neodpovídá předpokladu z důvodu naměřených vyšších hodnot střední aritmetické odchyly u plechů 5C, 3D, 8E, 9E a 10E a velkého naměřeného rozptylu mezi jednotlivými hodnotami. V grafu jsou rovněž znázorněny lineární regrese naměřených dat vzorků „C“ a „D“ s hodnotou spolehlivosti R^2 a rovnicemi lineární regrese. Hodnota spolehlivosti je 0,91 a 0,95 tzn., že se přibližují dokonalé korelaci, tj. mezi odhadem a skutečnými hodnotami technologických parametrů není téměř žádný rozdíl. V obr. 6.2 u naměřených dat vzorků „E“ nebyla graficky znázorněna lineární regrese nýbrž polynomická regrese s hodnotou spolehlivosti R^2 a rovnicí polynomické regrese. Polynomická regrese představuje proložení (aproximaci) zadaných hodnot polynomem a jde o zvláštní případ lineární regrese.

Za kritérium tváritelnosti se považuje tažnost A_{el} , exponent n a hodnota normálové anizotropie r . Teoreticky je možno napsat, že čím vyšší jsou jejich hodnoty, tím vyšší je tváritelnost ocelí za studena.

Bylo rovněž prokázáno, že vhodným kritériem tváritelnosti ocelí za studena může být poměr tažnosti a smluvní meze kluzu výchozího materiálu (6.1).

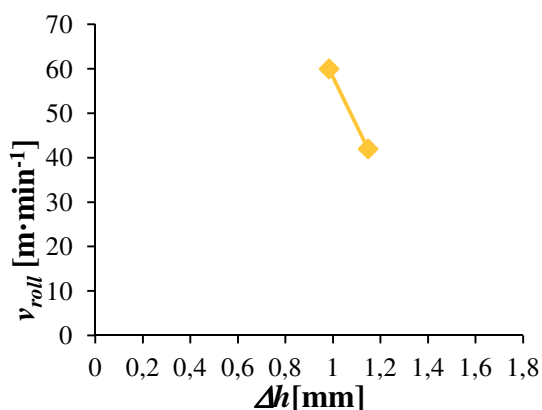
$$K_{ts} = \frac{A_{el10}}{R_{p0,2}} \quad (6.1)$$

S rostoucí hodnotou K_{ts} , která se u nízkouhlíkových a vysokouhlíkových ocelí nelegovaných a nízkolegovaných pohybuje mezi 0,01-0,16, tváritelnost za studena stoupá [11].

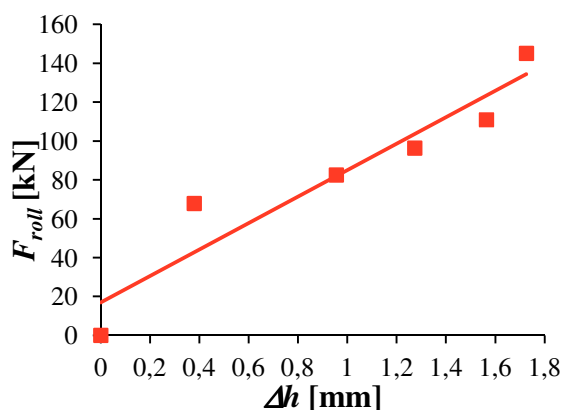
6.2 STANOVENÍ VYHOVUJÍCÍCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ

Protože základním cílem je dosažení lepších vlastností materiálu oproti konvenčnímu válcování (pevnost, houževnatost, plasticita, atd.), je nezbytná znalost vlivů jednotlivých parametrů ovlivňujících válcování.

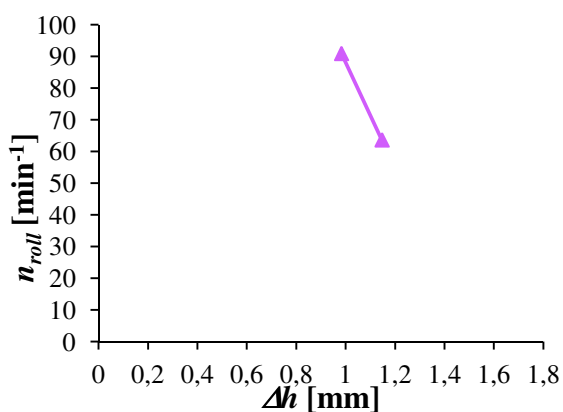
Vyhovující technologické parametry válcovací stolice DUO 210 SVa (vyhovující válcovací rychlost v_{rollC} , vyhovující válcovací síla F_{rollC} , vyhovující počet otáček n_{rollC} a jiné) byly stanoveny pro válcované plechy z hlubokotažné oceli (viz tab. 6.1) při válcovací rychlosti $v_{roll} = 42 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $v_{roll} = 60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pomocí regresních rovnic (obr. 6.3).



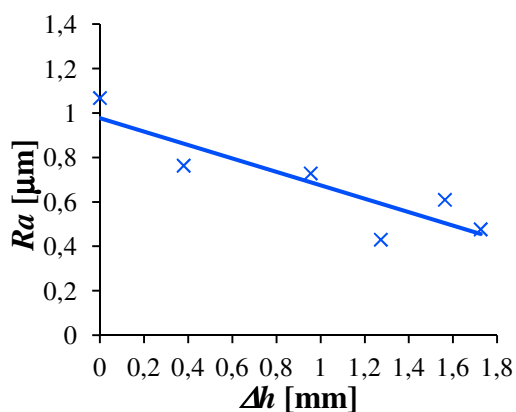
a)



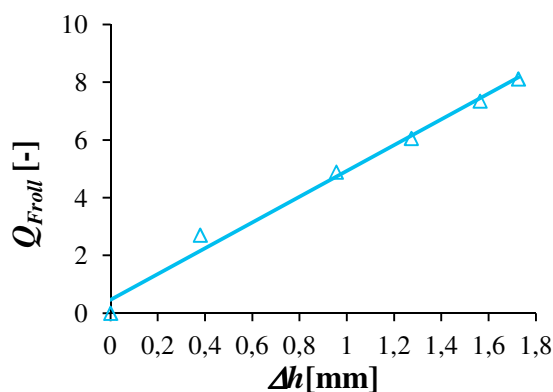
b)



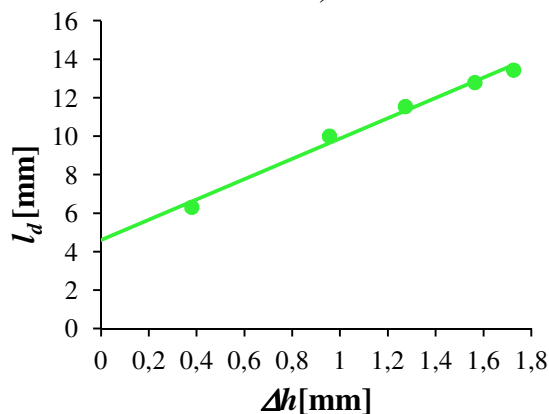
c)



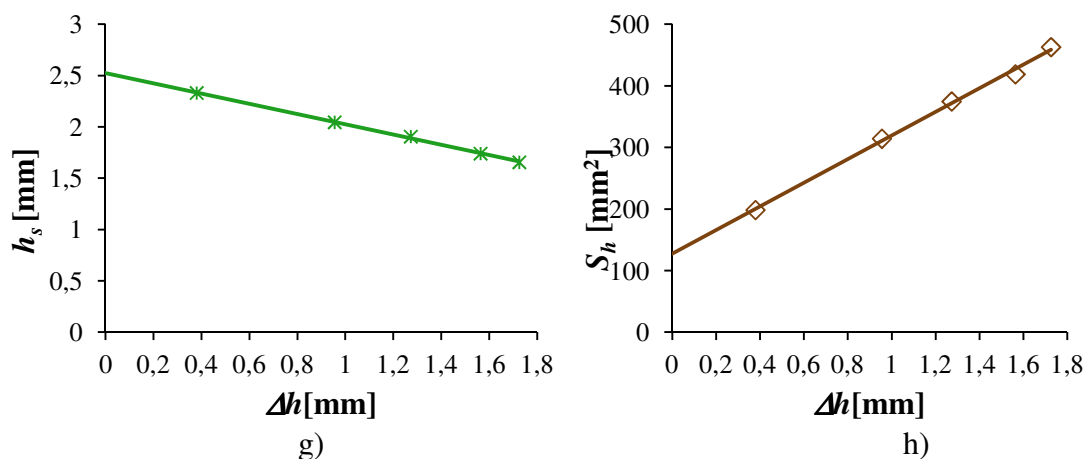
d)



e)



f)



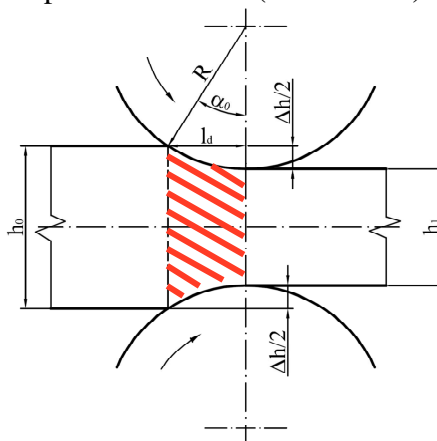
Obrázek 6.3 – Grafické znázornění závislosti technologických parametrů:

a) válcovací rychlosti v_{roll} [$m \cdot min^{-1}$]; b) válcovací síly F_{roll} [kN]; c) počtu otáček n_{roll} [min^{-1}]; d) střední aritmetické odchylky R_a [μm]; e) tvářecího faktoru Q_{Froll} [-]; f) délky pásmové deformace l_d [mm]; g) střední výšky válcovaného plechu h_s [mm]; h) horizontálního průmětu stykové plochy provačku s pracovní částí válce S_h [mm²] na absolutním úběru Δh [mm]

Protože otáčky n_{roll} uvedené v obr. 6.3 se týkají válců a souvisí s válcovací rychlostí (6.1) neboli rychlosti válců v_{roll} , které byly $v_{roll} = 42 m \cdot min^{-1}$ a $v_{roll} = 60 m \cdot min^{-1}$, tudíž jsou v grafu 6.3c) uvedeny pouze dvě hodnoty, tak jako v grafu 6.3a). Počet otáček n je možno určit z následujícího vztahu pro úhlovou rychlost ω a poloměr R

$$\omega = \frac{v}{R} \Rightarrow \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{v}{R} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 60}{R \cdot 2 \cdot \pi}. \quad (6.1)$$

Z poznatků získaných při měření bylo zjištěno, že topografie válcovaného plechu je ovlivněna při plastické deformaci geometrií pracovních válců válcovací stolice (především pásmem deformace). Geometrické pásmo deformace tvoří plochy provačku s válci ohraničené rovinou vstupu a výstupu kovu z válců (viz obr. 6.4).



Obrázek 6.4 – Pásmo deformace při podélném válcování

V tab. 6.1 jsou číselně vyjádřeny regresní rovnice z grafického znázornění závislosti absolutního úběru válcovaného plechu z hlubokotažné oceli na technologických parametrech válcovací stolice DUO 210 SVa.

Tabulka 6.1 – Stanovení vyhovujících technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa

Vyhovující technologický parametr	Lineární regrese (explicitní funkce)
vyhovující válcovací rychlost v_{rollC}	$v_{rollC} = -109,56 \cdot \Delta h + 167,65$
vyhovující válcovací síla F_{rollC}	$F_{rollC} = -68,146 \cdot \Delta h + 16,872$
vyhovující počet otáček n_{rollC}	$n_{rollC} = -166,07 \cdot \Delta h + 254,12$
vyhovující střední aritmetická odchylka Ra_C	$Ra_C = -0,30 \cdot \Delta h + 0,97$
vyhovující tvářecího faktoru Q_{FrollC}	$Q_{FrollC} = 4,47 \cdot \Delta h + 0,47$
vyhovující délka pásmové deformace l_{dC}	$l_{dC} = 5,28 \cdot \Delta h + 4,56$
vyhovující střední výška válcovaného plechu h_{sC}	$h_{sC} = -0,50 \cdot \Delta h + 2,52$
vyhovující horizontální průmět stykové plochy provalku s pracovní částí válce S_{hC}	$S_{hC} = 191,87 \cdot \Delta h + 127,47$
vyhovující povrchové napětí σ_{sC}	$\sigma_{sC} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \Delta h$
vyhovující velikost zrna D_{grC}	$D_{grC} = 0,05 \cdot (0,35 + 3,31 \Delta h)$

Pro ověření spolehlivosti těchto explicitních funkcí byly použity koeficienty determinace (hodnoty spolehlivosti), prostřednictvím kterých byly porovnány skutečné hodnoty technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa a jejich odhady. Hodnoty koeficientů determinace u závislosti Δh na technologických parametrech se pohybovaly od 0,80 – 1,00.

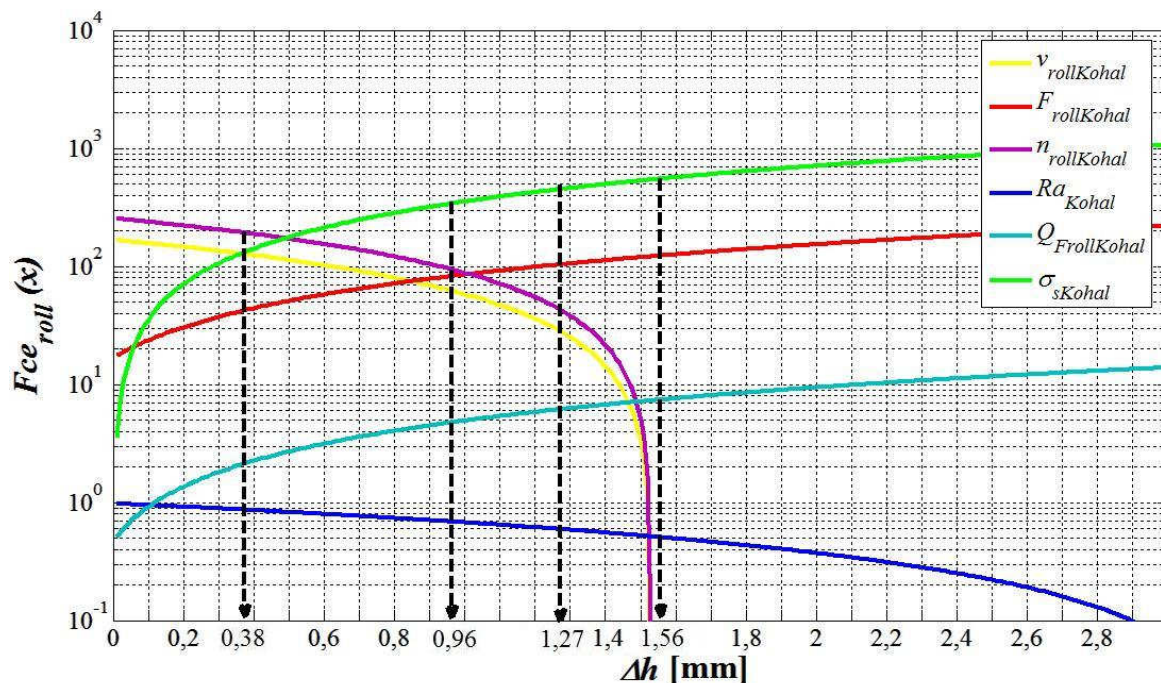
Na základě identifikace vazeb mezi technologickými parametry technologického procesu válcování byly z regresní analýzy experimentálních dat získány rovnice pro referenční materiál KOHAL. V tab. 6.2 jsou číselně znázorněny jednotlivé parametry vzhledem ke skutečnému naměřenému absolutnímu úběru Δh .

Tabulka 6.2 – Číselné vyjádření technologických parametrů při změně absolutního úběru u materiálu KOHAL

Δh [mm]	0,38	0,96	1,27	1,56
v_{rollC} [m·min⁻¹]	126,02	62,47	28,51	3,26
F_{rollC} [kN]	42,77	82,29	103,42	123,18
n_{rollC} [min⁻¹]	191,01	94,69	43,21	4,95
Ra_C [μm]	0,86	0,69	0,59	0,51
Q_{FrollC} [-]	2,16	4,75	6,14	7,43
σ_{sC} [MPa]	134,62	340,10	449,92	552,66
l_{dC} [mm]	6,60	9,66	11,29	12,83
h_{sC} [mm]	2,33	2,04	1,89	1,74
S_{hC} [mm²]	200,38	311,67	371,14	426,79
D_{grC} [μm]	0,08	0,18	0,23	0,28

Na základě tohoto zjištění byl sestaven algoritmus pro program Matlab za účelem matematického modelování výše uvedených vztahů.

Příklad průběhu základních parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při změně absolutního úběru Δh pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL o jakosti 697 je uveden na obr. 6.5. Křivky pro parametry l_d , h_s , S_h a D_{gr} nebyly pro zpřehlednění grafu na obr. 6.5 vykresleny.



Obrázek 6.5 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné oceli

Pro využití algoritmu i pro jiné materiály byly rovnice v tab. 6.1 upraveny prostřednictvím poměru konstant plasticity materiálu K_P (6.2)

$$K_P = \frac{10^{12}}{E^2}. \quad (6.2)$$

Jako porovnávací parametr byl vybrán modul pružnosti v tahu E . V tomto případě šlo o Youngův modul pružnosti hlubokotažné oceli řady KOHAL $E_{ddKohal}$ a nízkouhlíkové oceli PN EN 10263-2:2004 E_{Lcs} ($E_{Lcs} = 125\,580$ MPa). Pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL je konstanta $K_{PddKohal} = 28,69$ a pro nízkouhlíkovou ocel je konstanta $K_{PLcs} = 63,41$. Bylo zjištěno, že indexovým poměrem

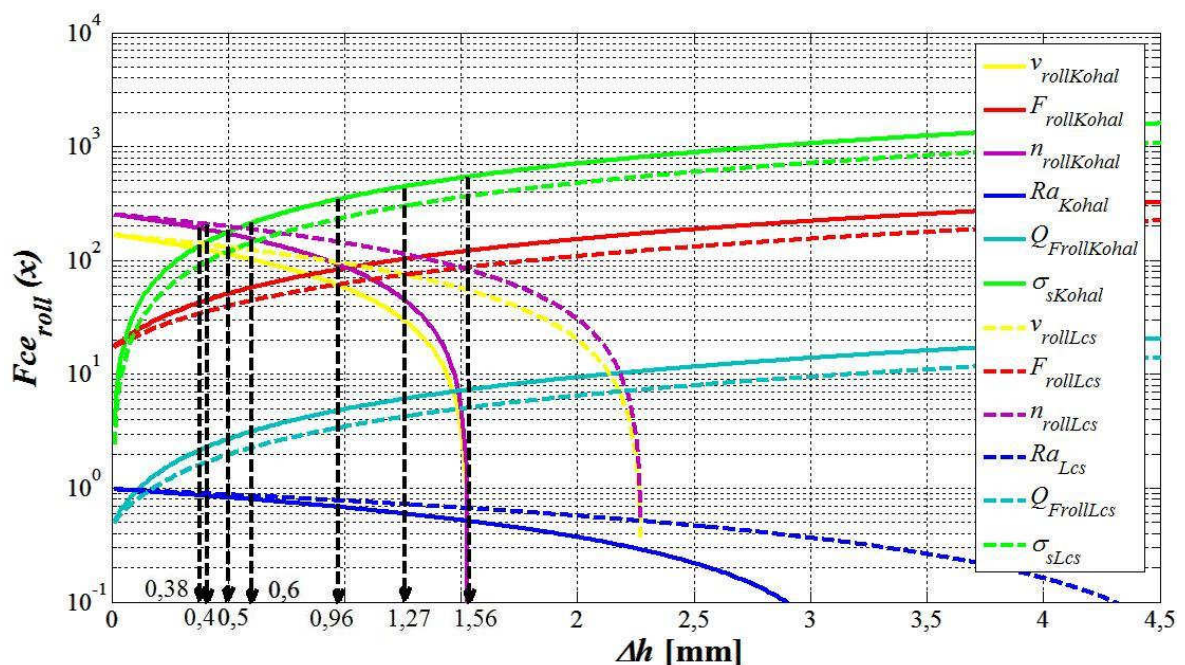
$$I_{Kp} = \sqrt{\frac{K_{PddKohal}}{K_{PLcs}}} \quad (6.3)$$

zavedeným do regresních vztahů k úběru, lze dobře jednotlivé materiály v procesu válcování diferencovat. Při dosazení indexového poměru do regresních rovnic mají výsledné regresní rovnice takovou podobu, viz tab. 6.3:

Tabulka 6.3 – Stanovení vyhovujících technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při válcování jiných materiálů

Vyhovující technologický parametr	Lineární regrese (explicitní funkce)
vyhovující válcovací rychlost v_{rollC}	$v_{rollC} = -109,56 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 167,65$
vyhovující válcovací síla F_{rollC}	$F_{rollC} = 68,15 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 16,87$
vyhovující počet otáček n_{rollC}	$n_{rollC} = -166,07 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 254,12$
vyhovující střední aritmetická odchylka Ra_C	$Ra_C = -0,30 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 0,98$
vyhovující tvářecího faktoru Q_{FrollC}	$Q_{FrollC} = 4,47 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 0,47$
vyhovující délka pásmové deformace l_{dC}	$l_{dC} = 5,28 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 4,59$
vyhovující střední výška válcovaného plechu h_{sC}	$h_{sC} = -0,50 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 2,52$
vyhovující horizontální průmět stykové plochy proalku s pracovní částí válce S_{hC}	$S_{hC} = 191,87 \cdot \Delta h \cdot I_{kp} + 127,47$
vyhovující povrchové napětí σ_{sC}	$\sigma_{sC} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \Delta h \cdot I_{kp}$
vyhovující velikost zrna D_{grC}	$D_{grC} = 0,05 \cdot (0,35 + 3,31 \cdot \Delta h \cdot I_{kp})$

Z těchto regresních rovnic vyplývá matematický model pro predikci technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při změně absolutního úběru Δh , a to jak pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL o jakosti 697, nízkouhlíkovou ocel (viz obr. 6.6), tak pro jakýkoliv válcovaný materiál obecně. Křivky pro parametry l_d , h_s , S_h a D_{gr} nebyly opět pro zpřehlednění grafu na obr. 6.6 vykresleny.

Obrázek 6.6 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné a nízkouhlíkové oceli

Opět v tab. 6.4 jsou znázorněny predikce jednotlivých parametrů u nízkouhlíkové oceli po číselném dosazení při změně skutečně naměřeného absolutního úběru Δh .

Tabulka 6.4 – Číslené vyjádření technologických parametrů při změně absolutního úběru u nízkouhlíkové oceli

Δh [mm]	0,4	0,5	0,6	0,8
v_{rollC} [m·min ⁻¹]	138,17	130,80	123,43	108,70
F_{rollC} [kN]	35,21	39,79	44,37	53,54
n_{rollC} [min ⁻¹]	209,44	198,27	187,10	164,76
Ra_C [μm]	0,90	0,88	0,86	0,82
Q_{FrollC} [-]	1,67	1,97	2,27	2,87
σ_{sC} [MPa]	95,32	119,15	142,98	190,63
l_{dC} [mm]	6,01	6,37	6,72	7,43
h_{sC} [mm]	2,39	2,36	2,32	2,26
S_{hC} [mm ²]	179,09	192,00	204,91	230,72
D_{grC} [μm]	0,06	0,07	0,08	0,11

6.3 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA KVALITU POVRCHU

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.5, základem hodnocení povrchu jsou měřené parametry, které však vesměs nabízejí jen dílčí pohled na některé vlastnosti povrchu. Ukazuje se, že právě praktická využitelnost stávajících a požadovaných parametrů pro posuzování funkčních vlastností povrchů by měla být věnována větší pozornost. Přispělo by to nejen ke kvalifikovanějšímu chápání vztahu povrchu k jeho funkci v širších souvislostech, ale i k potvrzení významu hodnocení topografie povrchu [16].

Na základě teoretických znalostí byl vyvinut nový postup pro stanovení hlavních technologických parametrů válcovací stolice. Hlavní rozdíl mezi nově vyvinutým postupem a současnými metodami výpočtu je následující: nově vyvinutý postup je založen na znalosti deformačních vlastností materiálů, na napětově-deformačních stavech a na úběru v různých fázích válcování. Kdežto současné metody, které využívají především geometrické změny při válcování, záběrové schopnosti válců a toků kovů v mezeře válců. Návrh se zabývá optimálně vyváženým systémem: válcovací síla oproti válcovací rychlosti nebo rychlost přenosu deformace v materiálu.

Získané výsledky z kapitoly 5, především výškové parametry Ra , jsou vstupními údaji do algoritmů, které jsou v disertační práci využity k predikčním účelům. Požadované a vytvořené algoritmy určují úroveň deformačního namáhání a intenzitu mechanické změny materiálu plechu na jednotlivých stupních válcování. Parametry technologie jsou pro jednotlivé válcovací stupně stanoveny tak, aby bylo možno z průběhu změn sledovaných tenzometrických parametrů nalézt přímé korelační vazby k parametrům technologickým. Jde zejména o volbu válcovacích rychlostí a velikostí úběrů. Ve vztahu k materiálu jde o predikci a výstupní kontrolu mechanických vlastností, zejména Youngova modulu pružnosti E . Pro experimentální válcovací stolicí DUO 210 SVa platí tyto regresní rovnice, které byly získány pomocí regresní analýzy výsledků experimentu pro válcovací proces:

$$v_{rollKohal} = 104,67 - 132,41 \cdot \Delta h + 160,18 \cdot \Delta h^2 - 83,56 \cdot \Delta h^3, \quad (6.4)$$

$$F_{rollKohal} = 43,63 + 329,16 \cdot \Delta h - 413,33 \cdot \Delta h^2 + 222,87 \cdot \Delta h^3, \quad (6.5)$$

$$n_{rollKohal} = \frac{v_{roll}}{R \cdot 2 \cdot \pi}, \quad (6.6)$$

$$Ra_{Kohal} = 1,03 - 0,53 \cdot \Delta h, \quad (6.7)$$

$$Q_{FrollKohal} = 0,579 + 2,50 \cdot \Delta h - 3,0 \cdot \Delta h^2 + 1,79 \cdot \Delta h^3, \quad (6.8)$$

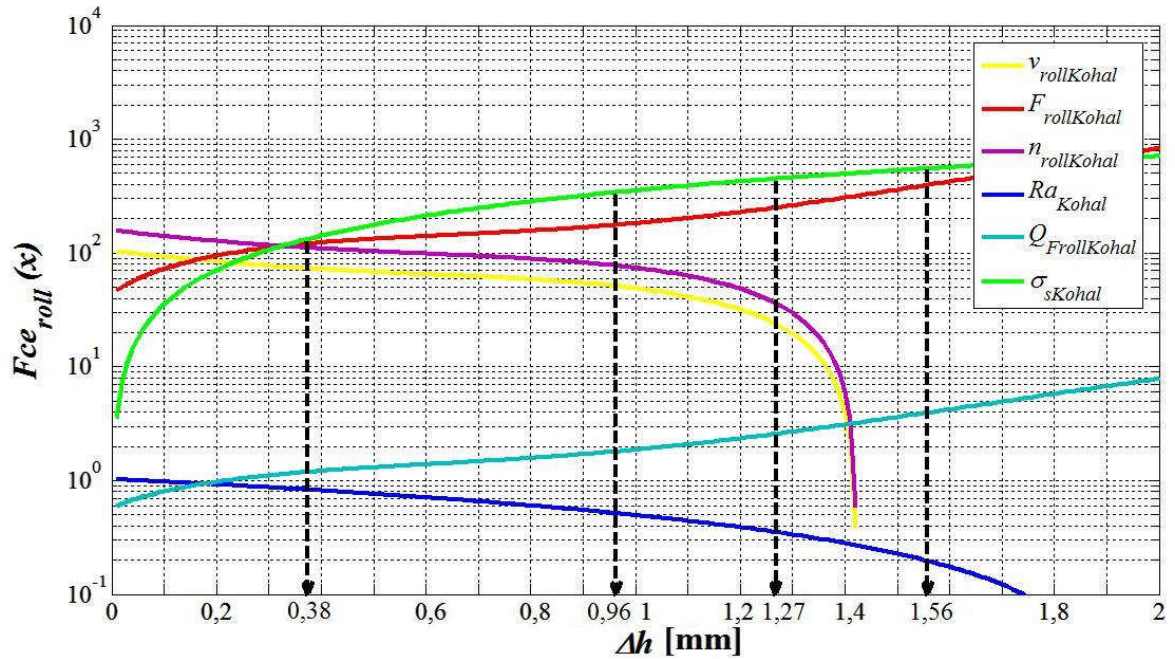
$$\sigma_{sKohal} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \Delta h. \quad (6.9)$$

Na základě identifikace vazeb mezi technologickými parametry technologického procesu válcování byly z regresní analýzy experimentálních dat získány rovnice (6.4-6.9) (algoritmus 1) pro referenční materiál KOHAL a v tab. 6.5 jsou znázorněny jednotlivé parametry po číselném dosazení vzhledem ke skutečnému naměřenému absolutnímu úběru Δh .

Tabulka 6.5 – Predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru u referenčního materiálu KOHAL

Δh [mm]	0,38	0,96	1,27	1,56
$v_{rollKohal}$ [m·min ⁻¹]	72,89	51,24	23,70	29,30
$F_{rollKohal}$ [kN]	121,26	175,88	251,52	397,34
$n_{rollKohal}$ [min ⁻¹]	110,49	77,67	35,92	44,42
Ra_{Kohal} [μm]	0,83	0,52	0,35	0,20
$Q_{FrollKohal}$ [-]	1,19	1,80	2,58	3,96
σ_{sKohal} [MPa]	134,62	340,10	449,92	552,66
l_{dKohal} [mm]	7,47	7,22	6,96	7,09
h_{sKohal} [mm]	6,25	4,02	2,70	1,79
S_{hKohal} [mm ²]	234,87	226,55	225,95	232,16
$D_{grKohal}$ [μm]	228,56	177,34	149,96	124,35

Příklad průběhu základních parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při změně absolutního úběru Δh pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL o jakosti 697 je uveden na obr. 6.7. Křivky pro parametry l_d , h_s , S_h a D_{gr} nejsou pro zpřehlednění grafu na obr. 6.7 vykresleny.



Obrázek 6.7 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné oceli

Pro využití algoritmu i pro jiné materiály byly rovnice (6.4-6.9) opět upraveny (viz kapitola 6.2) prostřednictvím poměru konstant plasticity materiálu K_p (6.2). Jako porovnávací parametr byl vybrán modul pružnosti v tahu E . V tomto případě se jednalo o Youngův modul pružnosti hlubokotažné oceli řady KOHAL $E_{ddKohal}$ a Youngův modul pružnosti nízkouhlíkové oceli PN EN 10263-2:2004 E_{Lcs} . Bylo zjištěno, že indexovým poměrem (6.3), zavedeným do regresních vztahů k úběru, lze dobře jednotlivé materiály v procesu válcování diferencovat [30]. Při dosazení indexového poměru do regresních rovnic, mají výsledné regresní rovnice pro obecný materiál takovou podobu (algoritmus 2):

$$v_{rollLcs} = 104,67 - 132,41 \cdot \Delta h \cdot I_{Kp} + 160,18 \cdot (\Delta h \cdot I_{Kp})^2 - 83,56 \cdot (\Delta h \cdot I_{Kp})^3, \quad (6.10)$$

$$F_{rollLcs} = 43,63 + 329,16 \cdot \Delta h \cdot I_{Kp} - 413,33 \cdot (\Delta h \cdot I_{Kp})^2 + 222,87 \cdot (\Delta h \cdot I_{Kp})^3, \quad (6.11)$$

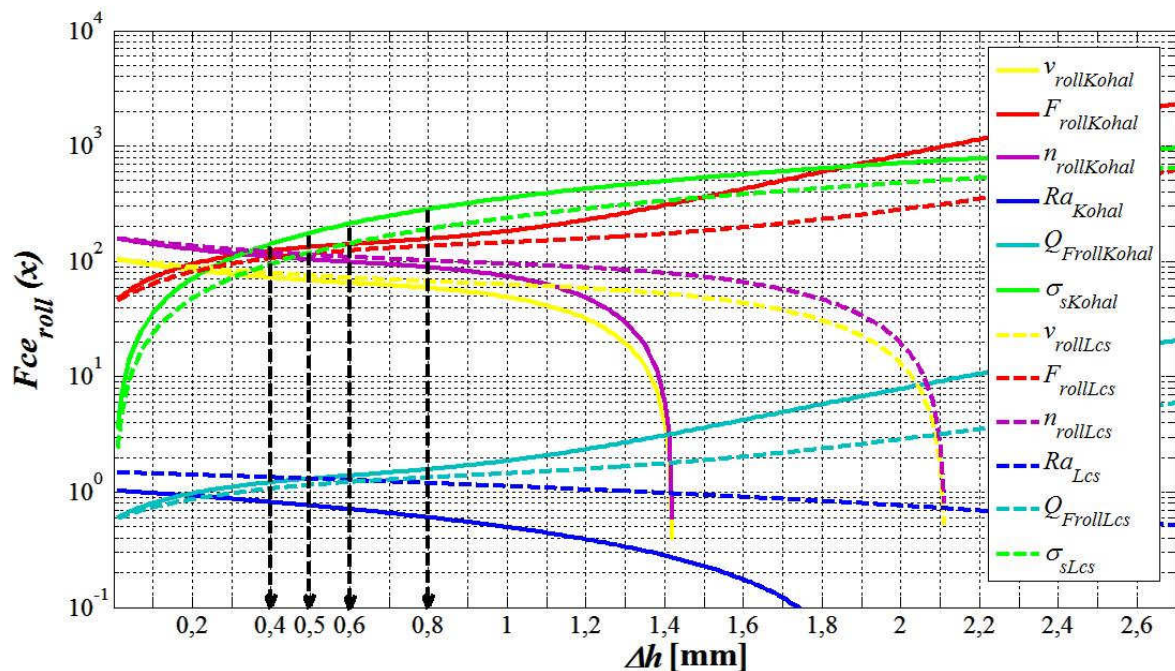
$$n_{rollLcs} \frac{v_{rollLcs}}{R \cdot 2 \cdot \pi}, \quad (6.12)$$

$$Ra_{Lcs} = 1,03 - 0,53 \cdot \Delta h \cdot I_{Kp}, \quad (6.13)$$

$$Q_{FrollLcs} = 0,58 + 2,50 \cdot \Delta h \cdot I_{Kp} - 3,00 \cdot (\Delta h \cdot I_{Kp})^2 + 1,79 \cdot (\Delta h \cdot I_{Kp})^3, \quad (6.14)$$

$$\sigma_{sLcs} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \Delta h \cdot I_{Kp}. \quad (6.15)$$

Z regresních rovnic (6.10-6.15) vyplývá matematický model pro predikci technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při změně absolutního úběru Δh a to pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL o jakosti 697 a nízkouhlíkovou ocel (viz obr. 6.8). Křivky pro parametry l_d , h_s , S_h a D_{gr} nebyly opět pro zpřehlednění grafu na obr. 6.8 vykresleny.



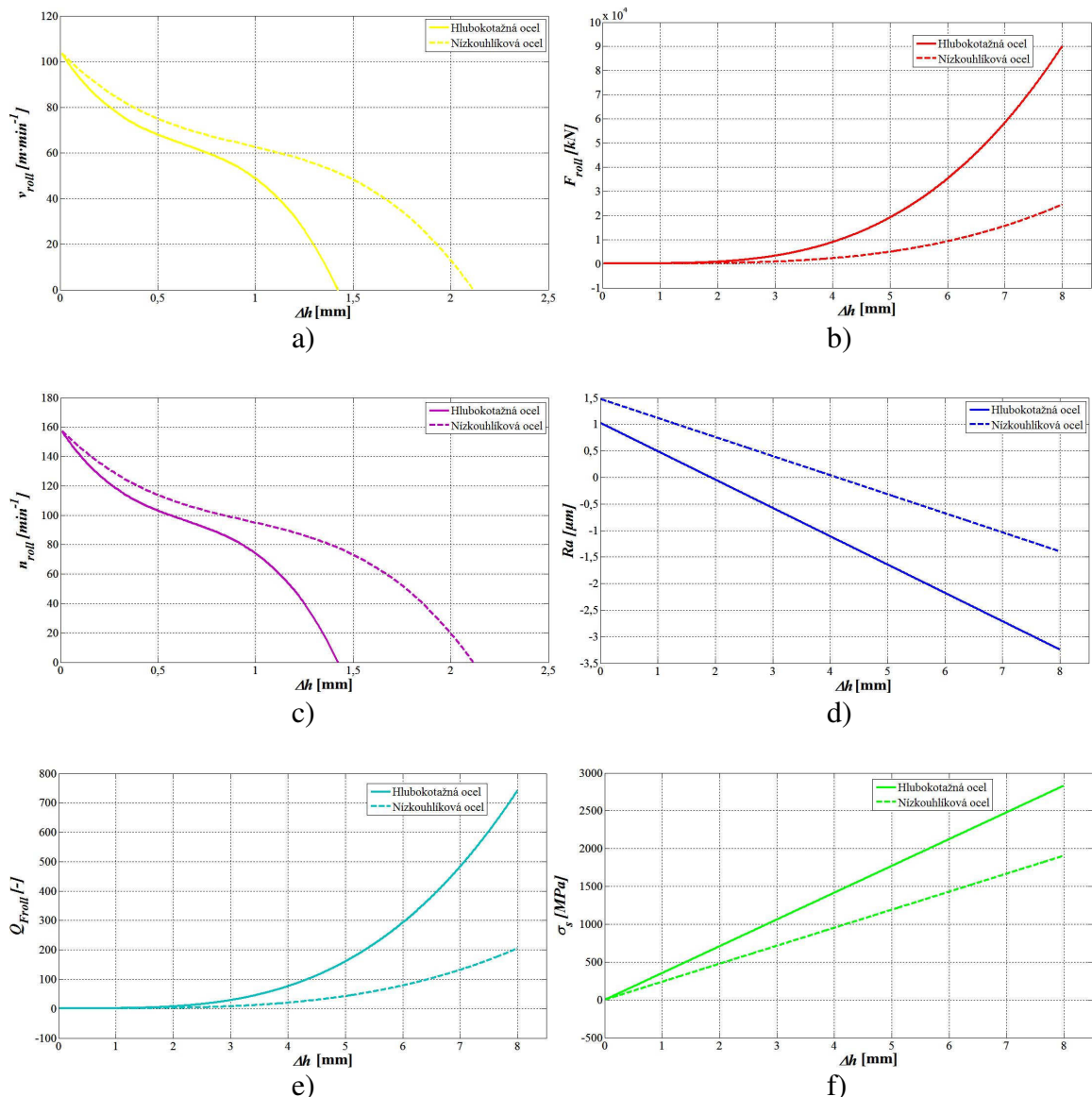
Obrázek 6.8 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u hlubokotažné a nízkouhlíkové oceli [33]

Pro nízkouhlíkovou ocel jsou v tab. 6.6 znázorněny jednotlivé parametry po číselném dosazení vzhledem ke skutečnému naměřenému absolutnímu úběru Δh .

Tabulka 6.6 – Predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru u nízkouhlíkové oceli

Δh [mm]	0,4	0,5	0,6	0,8
$v_{rollLcs}$ [m·min ⁻¹]	79,01	75,07	71,82	66,78
$F_{rollLcs}$ [kN]	106,61	116,06	123,80	135,80
$n_{rollLcs}$ [min ⁻¹]	119,76	113,79	108,87	101,22
Ra_{Lcs} [μm]	0,89	0,85	0,81	0,74
$Q_{FrollLcs}$ [-]	1,07	1,15	1,22	1,34
σ_{sLcs} [MPa]	95,32	119,15	142,97	190,63
l_{dLcs} [mm]	9,72	11,32	12,78	15,34
h_{sLcs} [mm]	9,09	9,85	10,49	11,49
S_{hLcs} [mm ²]	321,89	376,41	425,46	511,72
D_{grLcs} [μm]	238,36	232,42	226,48	214,60

Detailní grafické zobrazení jednotlivých technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při změně absolutního úběru Δh pro oba materiály je v obr. 6.9.



Obrázek 6.9 – Grafické znázornění závislosti technologických parametrů:
a) válcovací rychlosti v_{roll} [$m \cdot min^{-1}$]; b) válcovací síly F_{roll} [kN]; c) počtu otáček n_{roll} [min^{-1}];
d) střední aritmetické odchylky Ra [μm]; e) tvářecího faktoru Q_{Froll} [-]; f) povrchového napětí σ_s [MPa]
na změně absolutního úběru Δh

Technologické parametry v obr. 6.9 jsou v Matlabu v lineární závislosti k změně absolutního úběru Δh , nikoliv v logaritmické, jak je tomu v obr. 6.7.

6.4 ZÁVISLOST KVALITY POVRCHU NA VÁLCOVACÍ SÍLE

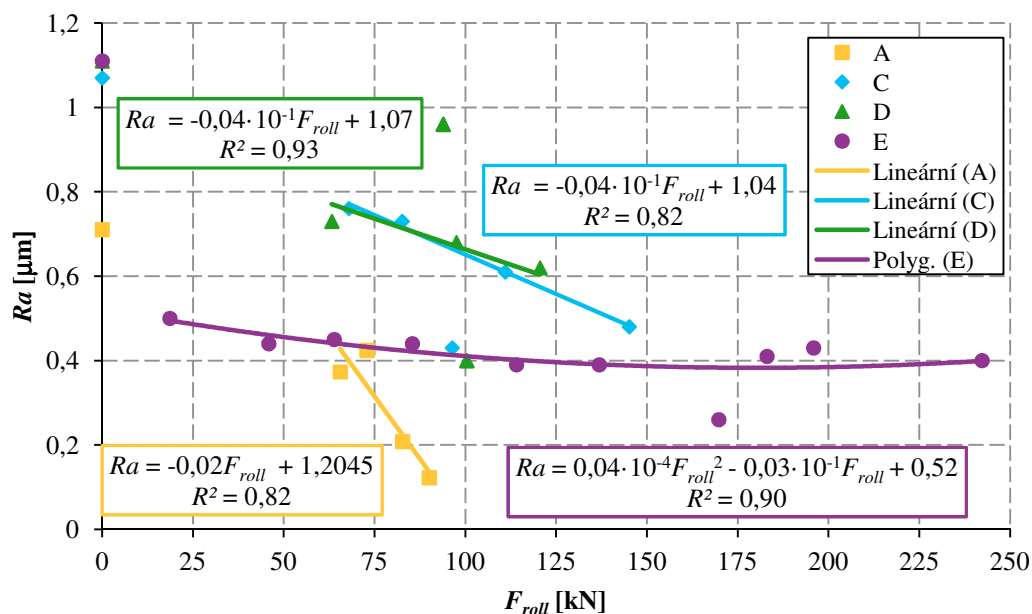
Kvalitu povrchu lze také vztáhnout k použité síle při válcování. Jak již bylo poznamenáno v kapitole 6.3, válcovací síla byla u hlubokotažné oceli změřena kovovými odporovými tenzometry. V průběhu měření se každých 0,00125 s zaznamenávala hodnota válcovací síly, a to až do času 0,6125 s. Čas při průběhu válcovací síly hraje důležitou roli, protože slouží k výběru vhodného regulátoru, který bude regulovat výslednou válcovací sílu. Z naměřených dat válcovací síly pomocí tenzometrů byly stanoveny regresní rovnice.

Skutečné naměřené válcovací síly u plechů z hlubokotažné oceli (označeny „C“ a „D“) a dopočítané válcovací síly u plechů z nízkouhlíkové oceli (označeny „A“) a z hlubokotažné oceli vytvořených na válcovací stoličce Q110 (označeny „E“) jsou znázorněny v tab. 6.7.

Tabulka 6.7 – Závislost střední aritmetické odchylky profilu povrchu na válcovací síle

Materiál vzorku	Označení plechu	Δh[mm]	Ra[μm]	F_{roll}[kN]
nízkouhlíková ocel	0A	-	0,71	0
	1A	0,4	0,37	65,56
	2A	0,5	0,43	72,91
	3A	0,6	0,21	82,71
	4A	0,8	0,12	90,07
hlubokotažná ocel vyprodukovaná při $v_{roll} = 0,7$ $m \cdot s^{-1}$	0C	-	1,07	0
	1C	0,38	0,76	67,89
	2C	0,96	0,73	82,60
	3C	1,27	0,43	96,40
	4C	1,56	0,61	110,96
hlubokotažná ocel vyprodukovaná při $v_{roll} = 1,0$ $m \cdot s^{-1}$	0D	-	1,11	0
	1D	0,31	0,73	63,22
	2D	0,85	0,68	97,54
	3D	1,14	0,96	93,89
	4D	1,65	0,40	100,39
hlubokotažná ocel vyprodukovaná válcovací stoličce Q110	5D	1,79	0,62	120,58
	0E	-	1,11	0
	1E	0,25	0,50	18,61
	2E	0,57	0,44	45,84
	3E	0,75	0,45	63,87
	4E	0,94	0,44	85,39
	5E	1,20	0,39	114,06
	6E	1,35	0,39	136,86
	7E	1,57	0,26	169,75
	8E	1,65	0,41	183,05
	9E	1,72	0,43	195,87
	10E	1,98	0,40	242,26

Teoreticky lze předpokládat, že čím větší úběr se požaduje, tím větší bude válcovací síla a také bude hladší povrch daného provačku. Grafické znázornění závislosti (obr. 6.9) střední aritmetické odchylky profilu povrchu na válcovací síle ukazuje klesající trend všech průběhů, který potvrzuje předpokládanou závislost Ra na válcovací síle, ale současně ukazuje, že tomu tak vždy být nemusí. Grafické znázornění průběhů v obr. 6.10 neodpovídá předpokladu z důvodu naměřených vyšších hodnot střední aritmetické odchylky u plechů 5C, 3D, 8E, 9E a 10E a velkého naměřeného rozptylu mezi jednotlivými hodnotami.



Obrázek 6.10 –Vliv válcovací síly na střední aritmetickou odchylku profilu povrchu u nízkouhlíkové a u hlubokotažné oceli

V grafu jsou rovněž znázorněny lineární regrese naměřených dat vzorků „A“, „C“ a „D“ s hodnotou spolehlivosti R^2 . Jak bylo zmíněno v kapitole 5.3, lineární regrese je proložení několika bodů v grafu takovou přímkou, aby součet druhých mocnin odchylek jednotlivých bodů od přímky byl minimální. Hodnota spolehlivosti R^2 je v rozmezí od 0,82 do 0,93 tzn., že se přibližují dokonalé korelaci, tj. mezi odhadem a skutečnými hodnotami technologických parametrů není téměř žádný rozdíl. V obr. 6.10 u naměřených dat vzorků „E“ nebyla graficky znázorněna lineární regrese nýbrž polynomická regrese s hodnotou spolehlivosti R^2 a rovnicí polynomické regrese.

Na základě výše uvedených poznatků o vlivu technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa na kvalitu povrchu je možno provést návrh řízení válcovací stolice DUO 210 SVa.

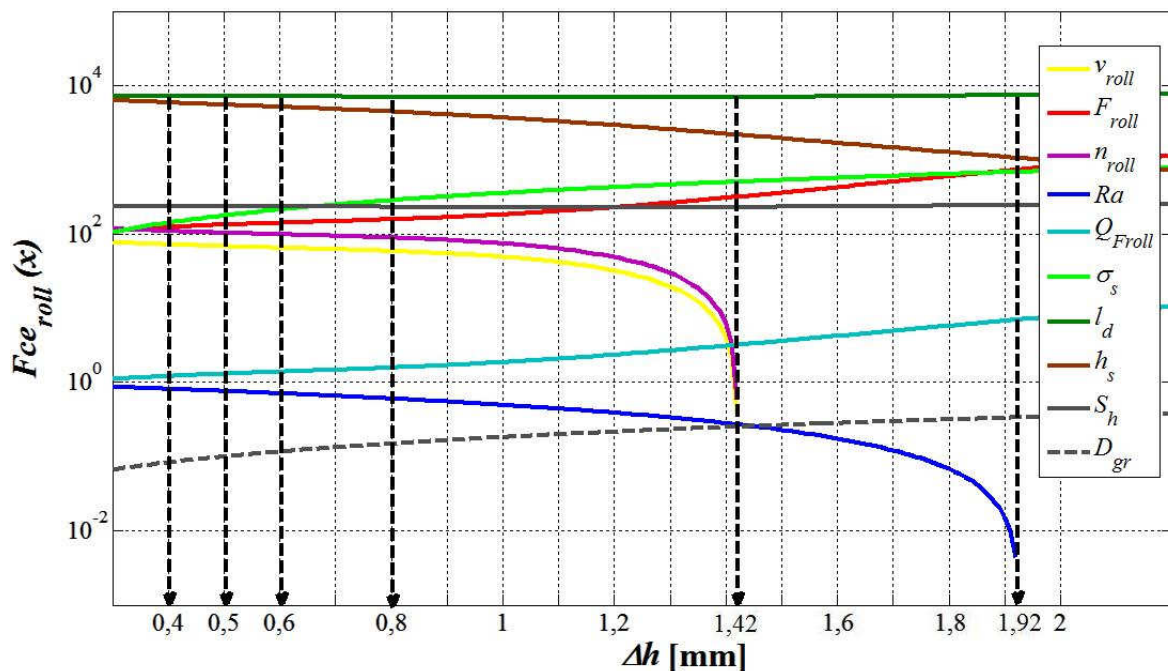
7 NÁVRH ŘÍZENÍ TECHNOLOGICKÉHO PROCESU PODÉLNÉHO VÁLCOVÁNÍ ZA STUDENA

Řízením procesu válcování se rozumí řízení celkových výrobních podmínek. Výrobními podmínkami se rozumí: složení oceli, teplota, časově deformační parametry, popř. způsob tepelného zpracování. Účelem válcování materiálů je získání kvalitního stavu povrchu, zajišťujícího zvýšení pevnostních vlastností při vyhovující houževnatosti a svařitelnosti [11].

Funkční zajištění automatizované kontroly vyžaduje od technologa volbu nejvhodnějšího přímého, eventuálně nepřímého měření kontrolovaného parametru, tj. v tomto případě parametru drsnosti Ra . Jde o volbu technicky nejvhodnějšího principu měření, a to jak po stránce metodiky měření vstupního signálu a aparatury, tak po stránce zajišťující zpětnou automatizační vazbu pro regulaci technologie v podmínkách provozu. Projekční práce na automatizované kontrole tedy vyžadují vedle znalosti průběhu distribuční funkce $Ra_i = f(l_i)$ válcovaného materiálu také znalost průběhů kalibračních funkcí k naměřené hodnotě zvolenou metodou měření.

Návrh řízení procesu podélného válcování za studena se týká měření distribuce okamžitých hodnot parametru drsnosti Ra u plechů z hlubokotažné oceli pomocí válcovací síly F_{roll} [kN]. Tento návrh řízení platí pro laboratorní válcovací stolicí DUO 210 SVa. V práci je analyzována možnost využití měření válcovací síly a její vazby k Ra . Změnu parametru Ra docílíme regulací válcovací rychlosti v_{roll} podle funkční vazby $F_{roll} = f(v_{roll})$. V disertační práci jde tedy o řízení technologických parametrů (válcovací rychlost v_{roll} , válcovací síla F_{roll} , počet otáček n_{roll} , střední aritmetická odchylka Ra , tvářecí faktor Q_{Froll} , povrchové napětí σ_s , délka pásma deformace l_d , střední tloušťka válcovaného plechu h_s , horizontální průmět stykové plochy S_h provalku s pracovní částí válce a velikost zrna D_{gr}).

Komplexní pohled, který byl vytvořen prostřednictvím matematického modelu pro predikci technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa, tj. pohled na mechanismus technologie válcování za studena u referenčního materiálu při změně absolutního úběru Δh je znázorněn na obr. 7.1.



Obrázek 7.1 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně absolutního úběru Δh u referenčního materiálu

Vybrané parametry absolutního úběru Δh tvoří na obr. 7.1 svislé řezy a v průřezu s křivkami jednotlivých funkcí z množiny $Fce_{roll}(x)$ se odečte kalkulovaná hodnota hledaného parametru pro zvolené Δh . Tyto hodnoty je možno přesně určit také analyticky z jednotlivých regresních rovnic po číselném dosazení (viz tab. 7.1).

Tabulka 7.1 – Hodnoty technologických parametrů podle požadavků na absolutního úběru Δh

Δh [mm]	0,4	0,5	0,6	0,8
v_{roll} [m·min ⁻¹]	71,98	68,06	64,83	58,47
F_{roll} [kN]	123,43	132,74	140,47	156,54
n_{roll} [min ⁻¹]	0,82	0,76	0,71	0,60
Ra [μm]	1,21	1,30	1,39	1,58
Q_{Froll} [-]	109,11	103,16	98,27	88,62
σ_s [MPa]	7,48	7,50	7,22	7,02
l_d [mm]	6,16	5,76	5,21	4,46
h_s [mm]	235,22	235,65	234,48	229,94
S_h [mm ²]	44,22	42,72	41,48	39,04

Pro využití algoritmu pro řízení procesu válcování na experimentální válcovací stolici podle volené, respektive požadované finální drsnosti Ra_{Kohal} byly rovnice (6.4-6-9) upraveny prostřednictvím funkční závislosti $\Delta h_X = f(Ra_{Kohal})$ podle (7.1)

$$\Delta h_X = \frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53}, \quad (7.1)$$

který je odvozen z rovnice (6.7). Po dosazení (7.1) do regresních rovnic, mají výsledné regresní rovnice takovou podobu (algoritmus 3):

$$\begin{aligned}
 v_{rollX} &= 104,67 - 132,41 \cdot \Delta h_X + 160,18 \cdot \Delta h_X^2 - 83,56 \cdot \Delta h_X^3 \Rightarrow \\
 v_{rollX} &= 104,67 - 132,41 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) + \\
 &+ 160,18 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right)^2 - 83,56 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right)^3,
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rollX} &= 43,63 + 329,16 \cdot \Delta h_X - 413,33 \cdot \Delta h_X^2 + 222,87 \cdot \Delta h_X^3 \Rightarrow \\
 F_{rollX} &= 43,63 + 329,16 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) - \\
 &- 413,33 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right)^2 + 222,87 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right)^3,
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

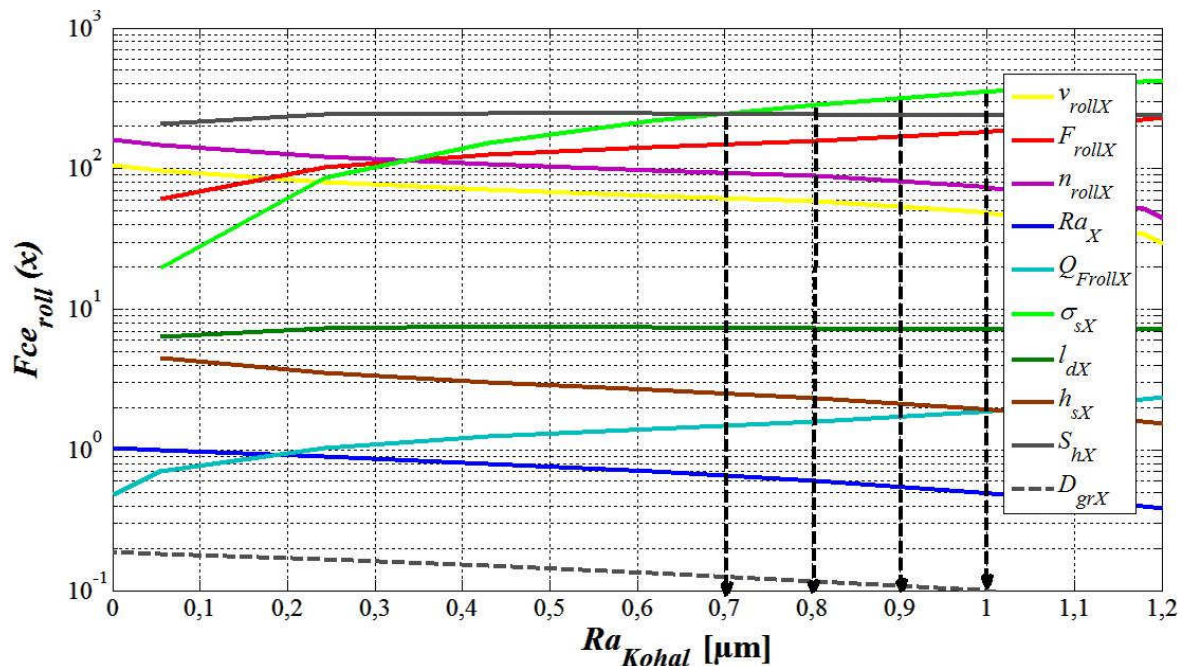
$$\begin{aligned}
 n_{rollX} &= \frac{v_{rollX}}{R \cdot 2 \cdot \pi} \Rightarrow n_{rollX} = \frac{104,67 - 132,41 \cdot \Delta h_X + 160,18 \cdot \Delta h_X^2 -}{R \cdot 2 \cdot \pi} - \\
 &- \frac{83,56 \cdot \Delta h_X^3}{R \cdot 2 \cdot \pi},
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

$$Ra_X = 1,03 - 0,53 \cdot \Delta h_X \Rightarrow Ra_X = 1,03 - 0,53 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right), \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{FrollX} &= 0,579 + 2,50 \cdot \Delta h_X - 3,00 \cdot \Delta h_X^2 + 1,79 \cdot \Delta h_X^3 \Rightarrow \\
 Q_{FrollX} &= 0,579 + 2,50 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) - 3,00 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right)^2 + \\
 &+ 1,79 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right)^3,
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

$$\sigma_{sX} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \Delta h_X \Rightarrow \sigma_{sX} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right). \tag{7.7}$$

Regresní rovnice (7.2-7.7) umožnily prostřednictvím matematického modelu komplexní pohled na mechanismus technologie válcování za studena u referenčního materiálu při změně finální drsnosti Ra (viz obr. 7.2).



Obrázek 7.2 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně finální drsnosti Ra_{Kohal} u referenčního materiálu

Zvolené parametry finální drsnosti Ra_{Kohal} tvoří na obr. 7.2 svislé řezy a v průřezu s křivkami jednotlivých funkcí z množiny $Fce_{roll}(x)$ se odečte kalkulovaná hodnota hledaného parametru pro zvolenou drsnost Ra_{Kohal} . Tyto hodnoty je možno přesně určit také analyticky z jednotlivých regresních rovnic po číselném dosazení (viz tab. 7.2).

Tabulka 7.2 – Hodnoty technologických parametrů podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu

$Ra_{Kohal}[\mu m]$	0,7	0,8	0,9	1
$\Delta h_X [mm]$	0,62	0,43	0,24	0,06
$v_{rollX} [m \cdot min^{-1}]$	64,31	70,70	80,77	97,80
$F_{rollX} [kN]$	141,74	126,47	102,37	60,66
$n_{rollX} [min^{-1}]$	97,48	107,17	122,42	148,24
$Ra_X [\mu m]$	0,70	0,80	0,90	1,00
$Q_{FrollX} [-]$	1,40	1,24	1,04	0,71
$\sigma_{sX} [MPa]$	218,68	152,34	86,00	19,66
$l_{dX} [mm]$	7,45	7,50	7,05	6,05
$h_{sX} [mm]$	5,32	6,04	6,81	8,54
$S_{hX} [mm^2]$	234,17	235,56	228,85	198,09
$D_{grX} [\mu m]$	0,13	0,15	0,17	0,18

Pro využití algoritmu pro řízení procesu válcování na experimentální válcovací stolici podle požadavků na finální drsnost Ra obecně i pro jiné materiály byly rovnice (6.10-6.15) upraveny prostřednictvím funkční závislosti $\Delta h_{XY} = f(Ra_{Xc})$ podle (7.1). Po dosazení vztahu (7.1) do regresních rovnic, mají výsledné regresní rovnice takovou podobu (algoritmus 4):

$$\begin{aligned}
 v_{rollXY} &= 104,67 - 132,41 \cdot \Delta h_X \cdot I_{Kp} + 160,18 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^2 - 83,56 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^3 \Rightarrow \\
 v_{rollXY} &= 104,67 - 132,41 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} + \\
 &+ 160,18 \cdot \left[\left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} \right]^2 - 83,56 \cdot \left[\left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} \right]^3,
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rollXY} &= 43,63 + 329,16 \cdot \Delta h_X \cdot I_{Kp} - 413,33 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^2 + 222,87 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^3 \Rightarrow \\
 F_{rollXY} &= 43,63 + 329,16 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} - \\
 &- 413,33 \cdot \left[\left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} \right]^2 + 222,87 \cdot \left[\left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} \right]^3,
 \end{aligned} \tag{7.9}$$

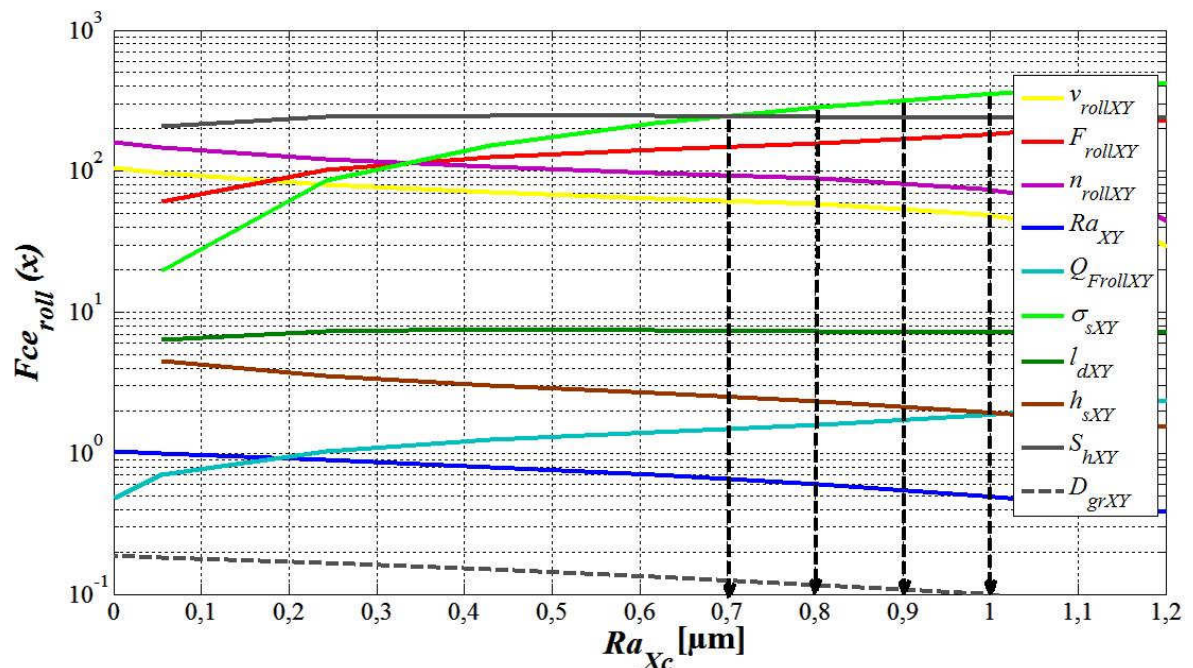
$$\begin{aligned}
 n_{rollXY} &= \frac{v_{rollXY}}{R \cdot 2 \cdot \pi} \Rightarrow n_{rollXY} = \frac{104,67 - 132,41 \cdot \Delta h_X \cdot I_{Kp} + 160,18 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^2}{R \cdot 2 \cdot \pi} - \\
 &- \frac{83,56 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^3}{R \cdot 2 \cdot \pi},
 \end{aligned} \tag{7.10}$$

$$Ra_{XY} = 1,03 - 0,53 \cdot \Delta h_X \cdot I_{Kp} \Rightarrow Ra_X = 1,03 - 0,53 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp}, \tag{7.11}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{FrollXY} &= 0,579 + 2,50 \cdot \Delta h_X \cdot I_{Kp} - 3,00 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^2 + 1,79 \cdot (\Delta h_X \cdot I_{Kp})^3 \Rightarrow \\
 Q_{FrollXY} &= 0,579 + 2,50 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} - 3,00 \cdot \left[\left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} \right]^2 + \\
 &+ 1,79 \cdot \left[\left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp} \right]^3,
 \end{aligned} \tag{7.12}$$

$$\sigma_{sX} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \Delta h_X \cdot I_{Kp} \Rightarrow \sigma_{sX} = 4,67 \cdot 10^{-5} + 354,27 \cdot \left(\frac{1,03 - Ra_{Kohal}}{0,53} \right) \cdot I_{Kp}. \tag{7.13}$$

Z regresních rovnic (7.8-7.13) byl opět umožněn prostřednictvím matematického modelu komplexní pohled na mechanismus technologie válcování za studena pro jiné materiály při změně finální drsnosti Ra (viz obr. 7.3).



Obrázek 7.3 – Grafické znázornění predikce technologických parametrů při změně finální drsnosti Ra_{Xc} pro jiné materiály (např. PN EN 10263-2:2004)

Zvolené parametry finální drsnosti Ra_{Xc} tvoří na obr. 7.3 svislé řezy a v průřezu s křivkami jednotlivých funkcí z množiny $Fce_{roll}(x)$ se odečte kalkulovaná hodnota hledaného parametru pro zvolenou drsnost Ra_{Xc} . Tyto hodnoty je možno přesně určit také analyticky z jednotlivých regresních rovnic po číselném dosazení, viz tab. 7.3.

Tabulka 7.3 – Hodnoty technologických parametrů podle požadavků na finální drsnost pro jiné materiály

$Ra_{Xc} [\mu m]$	0,7	0,8	0,9	1
$\Delta h_{XY} [mm]$	0,92	0,64	0,36	0,08
$v_{rollXY} [m \cdot min^{-1}]$	71,32	77,75	86,95	99,94
$F_{rollXY} [kN]$	125,00	109,65	87,33	55,35
$n_{rollXY} [min^{-1}]$	108,11	117,84	131,80	151,49
$Ra_{XY} [\mu m]$	0,81	0,88	0,94	1,01
$Q_{FrollXY} [-]$	1,23	1,10	0,92	0,67
$\sigma_{sXY} [MPa]$	147,09	102,47	57,85	13,22
$l_{dXY} [mm]$	13,09	10,19	6,77	3,13
$h_{sXY} [mm]$	10,66	9,31	7,40	4,68
$S_{hXY} [mm^2]$	433,44	338,85	225,56	104,35
$D_{grXY} [\mu m]$	0,15	0,16	0,17	0,18

7.1 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA VÝROBNOST

Složitost celého technologického procesu válcování souvisí s velkým počtem činitelů, které v podstatné míře ovlivňují hospodárnost výroby. Je velmi těžké uvést tyto ukazatele tak, aby se mohly využívat na porovnávací účely.

Pozornost je třeba věnovat základním technicko-ekonomickým ukazatelům, které charakterizují ekonomické vazby technologie válcování:

- strojové a přístrojové vybavení,
- spotřeba vstupního materiálu,
- spotřeba strojů, energie, paliva, vody,
- produktivita práce,
- ceny vstupního a výstupního materiálu,
- výrobnost a výkonnost technologických zařízení.

Strojové a přístrojové vybavení válcoven určuje úroveň technologického procesu a tím i kvalitu vyrobených polovýrobků.

Z hlediska produktivity, se může technologie válcování za studena považovat za optimální. Umožňuje vyprodukovat z předepsaných výchozích rozměrů největší množství válcovaných vývalků s danou kvalitou materiálu za jednotku času.

Průměrná výrobnost a výkonnost tratí v našich válcovnách jsou velmi rozdílné [11, 34].

Výkon výrobního zařízení se vždy uvažuje jako maximální výrobnost za jednotku času, obvykle za 1 hodinu, při normované jakosti a přesném dodržení technologického postupu a jakosti výrobků. Při jeho stanovení se vychází ze štítkového (jmenovitého) výkonu s přihlédnutím ke konkrétním podmínkám. Výkon výrobního zařízení je třeba vyjádřit ve výrobcích, stejně jako je vyjádřena výrobní kapacita. Pouze doplňkově může být vyjádřen v technických jednotkách.

Výkon výrobního zařízení se stanoví na základě kapacitních norem výrobnosti, jež určují maximální množství výrobků, které může být na daném výrobním zařízení zhotoveno za časovou jednotku [21].

V tomto případě se výkonová konstanta K_{DUO} experimentální válcovací stolice DUO 210 SVa zjistí podle vztahu (7.14), který vyjadřuje počet kg za minutu:

$$K_{DUO} = \frac{1}{T_{roll}} \cdot K_Z \cdot h_n \cdot b_s \cdot \pi \cdot D_{WR} \cdot \rho \cdot 10^{-9} \Rightarrow$$

$$K_{DUO} = \frac{1}{1} \cdot 0,06 \cdot 2,14 \cdot 33 \cdot \pi \cdot 210 \cdot 7600 \cdot 10^{-9} \Rightarrow K_{DUO} = 0,02 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1} \quad (7.14)$$

Potom počet kg na počet otáček za minutu Q_{DUO}

$$Q_{DUO} = K_{DUO} \cdot n_{roll} \quad (7.15)$$

Analogicky lze toto výpočtové schéma (7.14) po dosazení technických parametrů použít i pro průmyslové válcovací stolice. Změnou časových údajů lze evidentně snadno analyzovat výkon dosažený v [t·min⁻¹; t·hod⁻¹; t·směnu⁻¹; t·den⁻¹; t·týden⁻¹; t·měsíc⁻¹; t·rok⁻¹] a podobně také ceny výkonu.

Např. pro finální drsnost 0,7 μm u experimentální válcovací stolice DUO 210 SVa se určí výkon v tunách za rok takto:

$$Q_{DUO} = \frac{1}{1} \cdot 0,06 \cdot 2,14 \cdot 33 \cdot \pi \cdot 210 \cdot 7,6 \cdot 10^{-9} \cdot 60 \cdot 20 \cdot 250 \cdot n_{rollX} \Rightarrow$$

$$Q_{DUO} = 592,11 t \cdot rok^{-1}$$

Po vynásobení (7.15) cenou za tunu P (tj. jednotkovou cenou) se získá hodnota ceny výkonu za rok (7.16)

$$C_{rokX} = Q_{DUO} \cdot P, \quad (7.16)$$

např. pro finální drsnost $0,7 \mu m$:

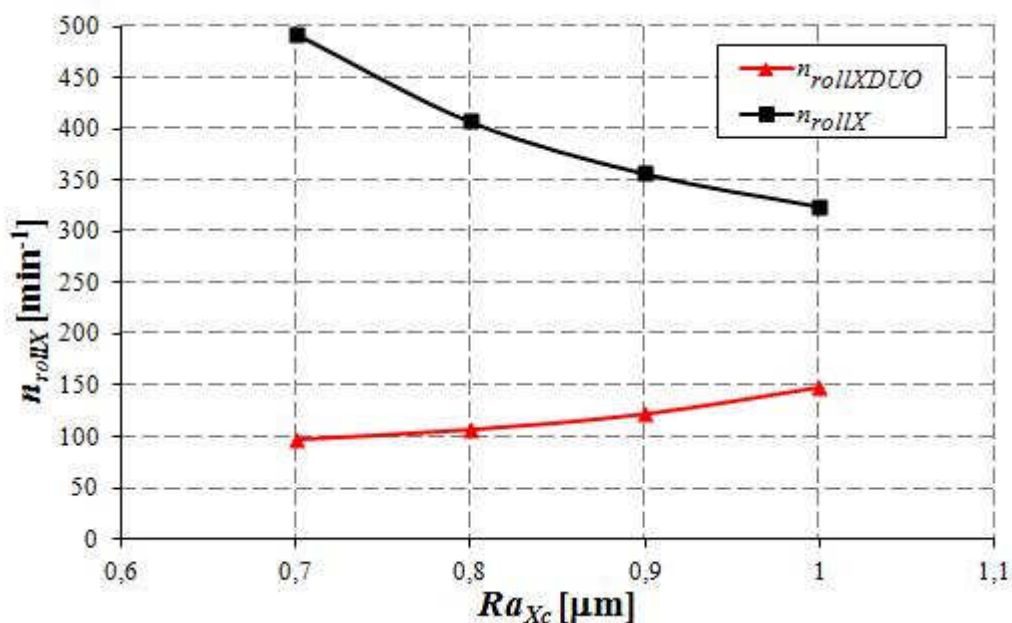
$$C_{rokX} = 592,11 \cdot 316,61 \Rightarrow C_{rokX} = 187468,48 \text{ Kč.}$$

Je to samozřejmě pouze hypoteticky, protože se jedná o experimentální válcovací stolici v TU v Košiciach, která slouží pro experimenty, nikoliv jako válcovací zařízení v provozu. Ale stejné vztahy (7.14-7.16) by platily i např. pro válcovací stolici typu 3,5 KVARTO pokud by válcovací trať tvořila pouze jedna stolice, tzv. jednostupňové válcování. Při kontinuálním válcování by docházelo podle počtu stupňů (podle počtu válcovacích stolic na válcovací trati) ke změně úběru v závislosti na parametrech válcování na jednotlivých stupních a celkový výkon by se počítal opět podle (7.15) a to z parametrů platných pro poslední stupeň na výstupu. Po číselném dosazení byla vytvořena tab. 7.4 pro válcovací stolici 210 SVa a pro 3,5 KVARTO. Podle rovnice (7.14) vychází pro $K_{DUO} = 0,02 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ a pro $K_{KVARTO} = 5,04 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$.

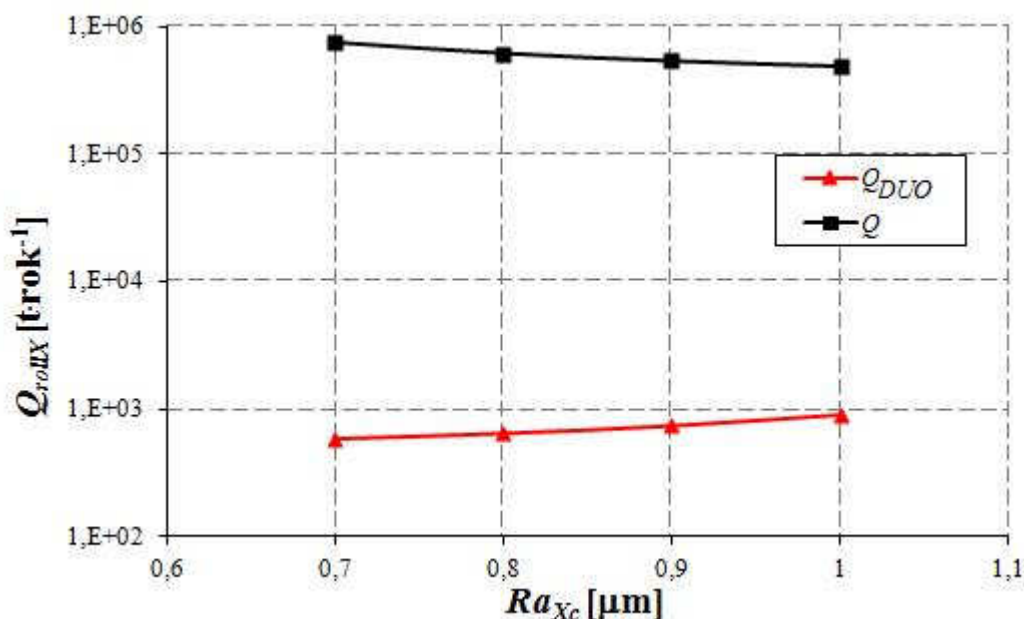
Tabulka 7.4 – Výkon podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu

Válcovací stolice	$Ra_{xc} [\mu m]$	0,7	0,8	0,9	1
DUO 210 SVa	$n_{rollX} [\text{min}^{-1}]$	97,48	107,17	122,42	148,24
	$Q_{DUO} [t \cdot \text{rok}^{-1}]$	592,11	650,95	743,62	900,43
3,5 KVARTO	$n_{rollXKvarto} [\text{min}^{-1}]$	493,74	407,75	356,94	324,68
	$Q_{Kvarto} [t \cdot \text{rok}^{-1}]$	746922,25	616846,01	539975,77	491166,72

Grafické vyjádření numerických hodnot z tab. 7.4 je provedeno na obr. 7.4 a obr. 7.5. Z uvedené tabulky a přiložených grafů plynou závislosti, do jaké míry požadovaná finální drsnost ovlivňuje výkon a tím ekonomické parametry válcování za studena. Pro DUO 210 SVa platí, že čím je menší drsnost povrchu, tím jsou nižší otáčky, nižší výkon a horší ekonomické ukazatele. Zatímco pro kontinuální válcování platí principiálně reciproká závislost. V jednotlivých stupních se postupuje od největšího úběru po nejmenší v posledním stupni, přičemž postupně klesá válcovací síla, zvyšuje se válcovací rychlost a snižuje se drsnost povrchu, tzn. zvýšení otáček a výkonu. Celkový výkon procesu se počítá z parametrů rychlosti a otáček na výstupu z posledního stupně.



Obrázek 7.4 – Grafické znázornění počtu otáček podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu



Obrázek 7.5 – Grafické znázornění výkonu podle požadavků na finální drsnost referenčního materiálu

7.2 ANALÝZA VSTUPNÍHO SIGNÁLU, ŘÍDICÍ FUNKCE A PRINCIP REGULACE

Jak již bylo výše uvažováno, je hledána vazba mezi válcovací rychlostí a měřenou válcovací silou. Při hodnocení válcovací síly se vycházelo z explicitních funkcí. Tato technika analýzy údajů umožňuje popsat strukturu závislostí souboru procesních faktorů, které ovlivňují válcovací sílu válcovací stolice, tj. válcovací rychlost v_{roll} , úběh Δh , střední

aritmetická odchylka Ra . Matematicky je možno zapsat tuto funkci v následujícím implicitním tvaru pro celkovou válcovací sílu (7.17)

$$F_{roll} = f(v_{roll}, \Delta h, Ra, \text{výkon}). \quad (7.17)$$

Obecně mezi válcovací rychlostí a válcovací silou platí odvozený vztah (7.17) určený na základě změřených hodnot.

$$F_{roll} = F_{rollC} \cdot \left(\frac{v_{roll}}{v_{rollC}} \right). \quad (7.18)$$

Vztah (7.18) lze interpretovat v neregulovaném režimu tak, že čím rychleji se pohybují válce, tím je válcovací síla vyšší a naopak. Tato lineární závislost je využita při návrhu regulátoru pro řízení podélného válcování za studena.

Popis regulačního procesu vyžaduje odvození rovnic pro regulovanou válcovací rychlost $v_{rollreg}$. Tato proměnná je obsažena v rovnici (7.18). Položí-li se $v_{roll} = v_{rollreg}$ a $F_{roll} = F_{rollreg}$, pak po úpravě se dostane

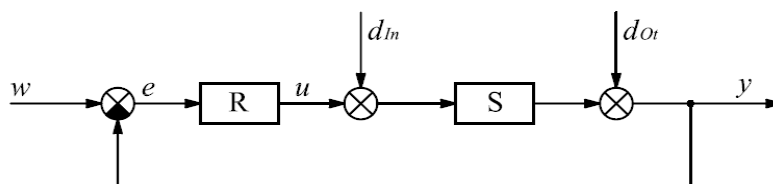
$$v_{rollreg} = F_{rollreg} \frac{v_{rollC}}{F_{rollC}}. \quad (7.19)$$

V regulovaném režimu vztah (7.19) je vyjádřením závislosti válcovací síly na regulované válcovací rychlosti. Pokud budu vycházet z rovnice (7.19), pak je možno vyjádřit regulovanou válcovací sílu $F_{rollreg}$

$$F_{rollreg} = \frac{F_{rollC} \cdot v_{rollreg}}{v_{rollC}}. \quad (7.20)$$

7.3 NÁVRH STRUKTURY REGULAČNÍHO OBVODU

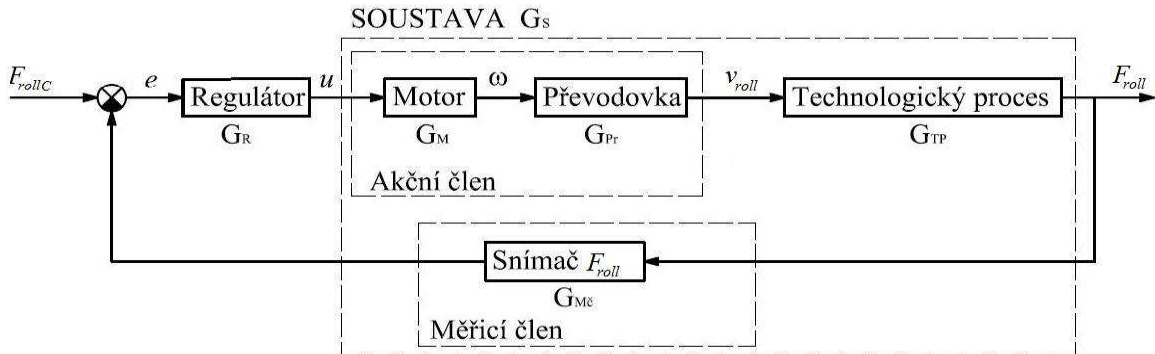
Na základě rozboru předmětné problematiky je uvedeno zjednodušené blokové schéma regulačního obvodu na obr. 7.6 [2].



Obrázek 7.6 - Zjednodušené blokové schéma regulačního obvodu

Na obr. 7.6 je w žádaná hodnota regulované veličiny y , dále e odchylka výstupní veličiny od žádané hodnoty w , R regulátor, u akční veličina, d_{in} porucha na vstupu, S regulovaná soustava, d_{ot} porucha na výstupu a y je výstupní (regulovaná) veličina. Při návrhu konkrétního typu regulátoru se neuvažuje vliv poruch.

Pro názornost komplexního řešení je zjednodušený model převeden do následujícího tvaru (viz obr. 7.7), podle kterého ilustrativně vyplývá návrh způsobu řízení regulačního procesu [2].



Obrázek 7.7 – Blokové schéma měření a regulace v_{roll}

Na obr. 7.7 je $w = F_{rollC}$ žádaná hodnota regulované veličiny $y = F_{roll}$, $F_{roll} = f(v_{roll}, \Delta h, Ra, výkon)$, akční veličinou je $u = U$, kde U je napájení elektromotoru, ω je úhlová rychlost rotoru $\omega = f(U)$ a v_{roll} je válcovací rychlost.

7.4 NÁVRH REGULÁTORU TYPU PID

Na základě obr. 7.7 lze jednotlivé členy popsat následujícími zjednodušenými vztahy:

$$G_M(s) = \frac{k_M}{T_M s + 1} = \frac{\Omega(s)}{U(s)}, \quad (7.21)$$

$$G_{Pr}(s) = \frac{k_{Pr}}{T_{Pr} s + 1} = \frac{V_{roll}(s)}{\Omega(s)}, \quad (7.22)$$

$$G_{TP}(s) = \frac{k_1}{v_{roll}} = \frac{F_{roll}(s)}{V_{roll}(s)}, \quad (7.23)$$

$$G_{Mč}(s) = \frac{1}{T_{Mč} s + 1}, \quad (7.24)$$

kde je: $G_M(s)$ - obrazový přenos elektromotoru [-],
 s - komplexní proměnná [-],
 $\Omega(s)$ - obraz úhlové rychlosti rotoru [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],
 $U(s)$ - obraz akční veličiny [-],
 $V_{roll}(s)$ - obraz válcovací rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 $F_{roll}(s)$ - obraz válcovací síly [kN],
 $G_{Pr}(s)$ - obrazový přenos převodovky [-],
 $G_{TP}(s)$ - obrazový přenos technologického procesu [-],
 $G_{Mč}(s)$ - obrazový přenos měřicího členu [-],
 k_M - konstanta elektromotoru [-],

- T_M - časová konstanta elektromotoru [s],
- k_{Pr} - konstanta převodovky [-],
- T_{Pr} - časová konstanta převodovky [s],
- k_I - optimální válcovací síla [kN],
- $T_{MČ}$ - setrvačnost měřicího členu [s].

Pro výpočet obrazového přenosu soustavy technologie podélného válcování za studena platí:

$$G_S(s) = G_M(s) \cdot G_{Pr}(s) \cdot G_{TP}(s) \cdot G_{MČ}(s). \quad (7.25)$$

$$G_S(s) = \frac{k_M}{T_M s + 1} \cdot \frac{k_{Pr}}{T_{Pr} s + 1} \cdot \frac{k_I}{v_{roll}} \cdot \frac{1}{T_{MČ} s + 1}. \quad (7.26)$$

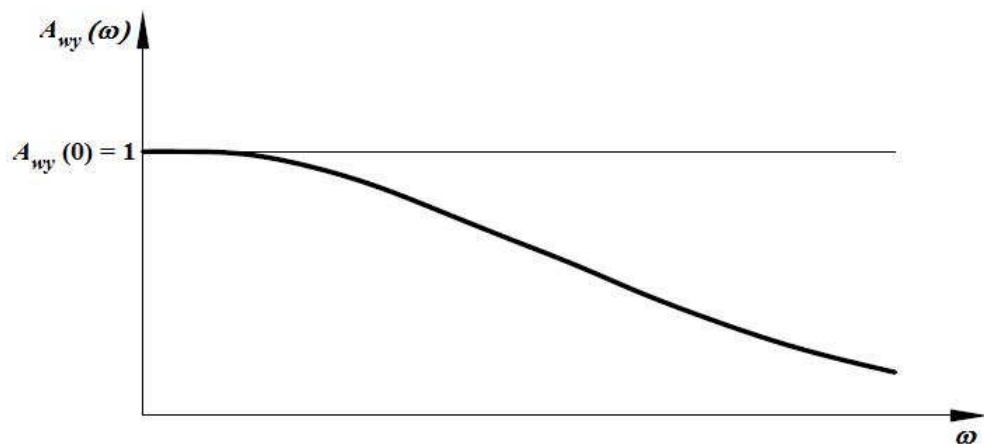
$$G_S(s) = \frac{k_M k_{Pr} k_I}{v_{roll}} \cdot \frac{1}{(T_M s + 1)(T_{Pr} s + 1)(T_{MČ} s + 1)}. \quad (7.27)$$

Parametry v matematických modelech (7.21) až (7.27) byly odvozeny na základě informací z poskytnutého štítku motoru válcovací stolice.

Konkrétní zadané konstanty:

1. Elektromotor: $k_M = 48,571$ [-],
 $T_M = 0,238$ [s].
2. Převodovka: $k_{Pr} = 0,002$ [-],
 $T_{Pr} = 0,001$ [s].
3. Technologický proces: $k_I = F_{rollC} = 125,05$ [kN],
 $v_{roll} = 0,7$ [m·s⁻¹].
4. Měřicí člen: $T_{MČ} = 0,00125$ [s].

Pro výpočet stavitelných parametrů regulátoru k popsanému systému byla zvolena metoda optimálního modulu (MOM) [33]. Předpokládá se, že požadovaný průběh amplitudové kmitočtové charakteristiky $A_{wy}(\omega)$ by měl být monotónně klesající funkci v souladu s obr. 7.8 [44]. Z tvaru soustavy vyplývá doporučený regulátor PID.



Obrázek 7.8 – Požadovaný průběh modulu kmitočtového přenosu řízení pro metodu optimálního modulu [44]

Zvolená soustava:

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(T_M s + 1) \cdot (T_{M\check{C}} s + 1) \cdot (T_{Pr} s + 1)}, \text{ kde} \quad (7.28)$$

$$K_S = \frac{k_M k_{Pr} k_1}{v_{roll}}, \text{ kde } K_S = 17,354. \quad (7.29)$$

Dále jsou z metody optimálního modulu vypočítány parametry PID regulátoru na základě upraveného přenosu soustavy (7.28):

$$T_I^* = T_M + T_{M\check{C}} \Rightarrow T_I^* = 0,239,$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{2 \cdot K_S \cdot T_{Pr}} \Rightarrow k_p^* = 6,893,$$

$$T_D^* = \frac{T_M \cdot T_{M\check{C}}}{T_M + T_{M\check{C}}} \Rightarrow T_D^* = 0,002,$$

kde je: T_I^* - integrační konstanta regulátoru,
 k_p^* - zesílení regulátoru,
 T_D^* - derivační konstanta regulátoru [33].

Ze vztahu (7.28) je také možno stanovit výpočet stavitelných parametrů regulátoru k popsanému systému metodou požadovaného modelu (MPM) [33] a opět regulátor PID.

Zvolená soustava:

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(T_M s + 1) \cdot (T_{M\check{C}} s + 1) \cdot (T_{Pr} s + 1)} \approx \frac{K_S}{(T_M s + 1) \cdot (T_{Pr} s + 1)} \cdot e^{-T_{M\check{C}} s}, \quad (7.30)$$

Regulační proces požadujeme s překmitem, tj. $\kappa = 0,05$. Na základě tabulky uvedené v literatuře [33] získáme koeficient metody požadovaného modelu $\beta = 1,944$ (přičemž vzorkovací perioda $T = 0$), a to z důvodu, že jsme použili analogový regulátor. Na základě uvedeného platí pro $a = \frac{1}{\beta \cdot T_{M\dot{C}}}$.

Na základě upraveného přenosu soustavy (7.30) jsou z metody požadovaného modelu vypočteny parametry PID regulátoru:

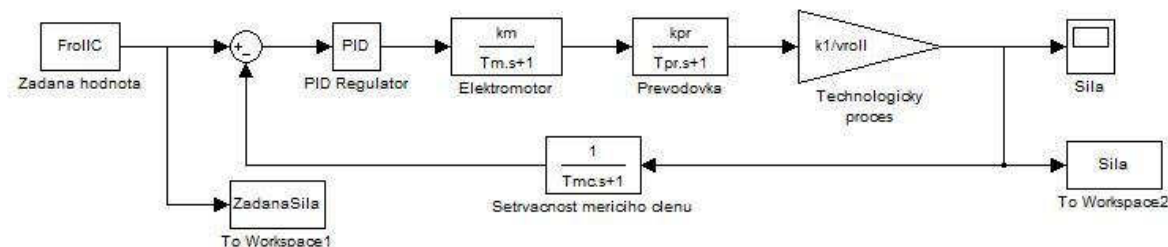
$$T_I^* = T_M + T_{Pr} \Rightarrow T_I^* = 0,239,$$

$$k_p^* = \frac{aT_I^*}{K_S} \Rightarrow k_p^* = 5,668,$$

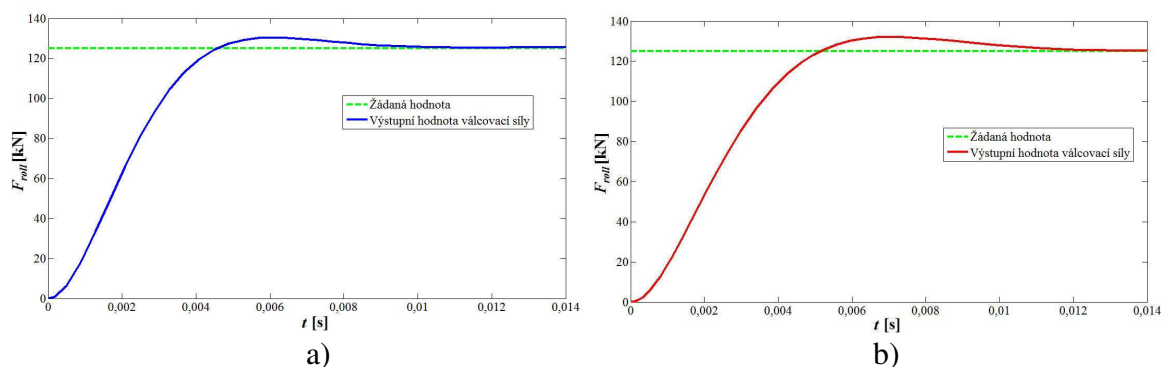
$$T_D^* = \frac{T_M \cdot T_{Pr}}{T_M + T_{Pr}} \Rightarrow T_D^* = 0,001,$$

Číslicová simulace

Pro simulaci popsaného systému při stanovení výpočtu stavitelných parametrů regulátoru metodou optimálního modulu a metodou požadovaného modelu bylo použito simulační prostředí Matlab - Simulink. Zde bylo vytvořeno simulační schéma obsahující regulátory PID se soustavou (obr. 7.9). V tomto schématu je možné zadávat žádanou hodnotu, dále pozorovat průběh výstupní veličiny a také získat vykreslení přechodové charakteristiky žádané veličiny a výstupních veličin (viz obr. 7.10).



Obrázek 7.9 – Schéma regulačního obvodu v prostředí Simulink



Obrázek 7.10 – Grafické porovnání výstupní válcovací síly v závislosti na čase u regulátorů typu PID:
a) MOM; b) MPM

V obr. 7.10 je grafické porovnání výstupních válcovacích sil v závislosti na čase u regulátorů typu PID, jejichž stavitelné parametry jsou určeny metodou optimálního modelu (MOM) a metodou požadovaného modelu (MPM). Při použití regulátoru typu PID, jehož stavitelné parametry jsou vypočteny pomocí MOM, dochází k rychlejší regulaci než při použití regulátoru typu PID, jehož stavitelné parametry jsou vypočteny pomocí MPM. Díky regulátoru PID, jehož stavitelné parametry jsou vypočteny pomocí MOM, se válcovací síla během cca 0,01 s dostává na žádanou hodnotu ($F_{rollC} = 125,05$ kN), což se bez použití regulátoru nepotvrdilo (viz obr. 5.11).

7.5 NÁVRH REGULÁTORU TYPU PI

Upravený vztah (7.28) je možné použít také pro regulátor typu PI, jehož stavitelné parametry jsou stanoveny z metody optimálního modulu. Rovněž zde se předpokládá monotónně klesající průběh amplitudové kmitočtové charakteristiky $A_{wy}(\omega)$ uzavřeného regulačního obvodu [44].

Zvolená soustava:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{(T_M s + 1) \cdot ([T_{M\check{C}} + T_{Pr}] \cdot s + 1)} \approx \frac{K_s}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}. \quad (7.31)$$

Pro další řešení se převedou časy T_M , T_{Pr} , $T_{M\check{C}}$ do časové konstanty T_1 a T_2 :

$$T_1 = T_M, \quad (7.32)$$

$$T_2 = T_{M\check{C}} + T_{Pr}. \quad (7.33)$$

Dále jsou z metody optimálního modulu vypočítány parametry PI regulátoru:

$$T_I^* = T_1 \Rightarrow T_I^* = 0,238,$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{2 \cdot K_s \cdot T_2} \Rightarrow k_p^* = 3,048.$$

Po úpravě vztahu (7.31) na (7.34) vyplývá použití regulátoru typu opět PI, ale jeho stavitelné parametry jsou tentokrát vypočítány metodou požadovaného modelu.

Zvolená soustava:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)} \approx \frac{K_s}{T_1 s + 1} \cdot e^{-T_2 s}, \quad (7.34)$$

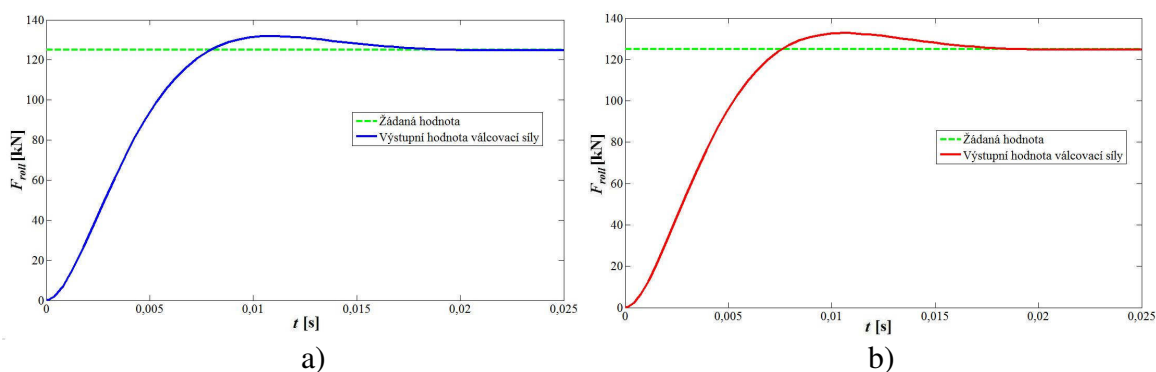
kde opět se dosadí vztah (7.32 a 7.33) a z metody požadovaného modelu se stanoví parametry PI regulátoru:

$$T_I^* = T_1 \Rightarrow T_I^* = 0,238,$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{\beta \cdot T_2 \cdot K_S} \Rightarrow k_p^* = 3,135.$$

Číslicová simulace

Pro simulaci systému bylo opět použito simulační prostředí Matlab - Simulink. Zde platí obdobné možnosti jako při předešlé simulaci. Bylo vytvořeno schéma obsahující regulátory PI se soustavou a přechodové charakteristiky (obr. 7.11).

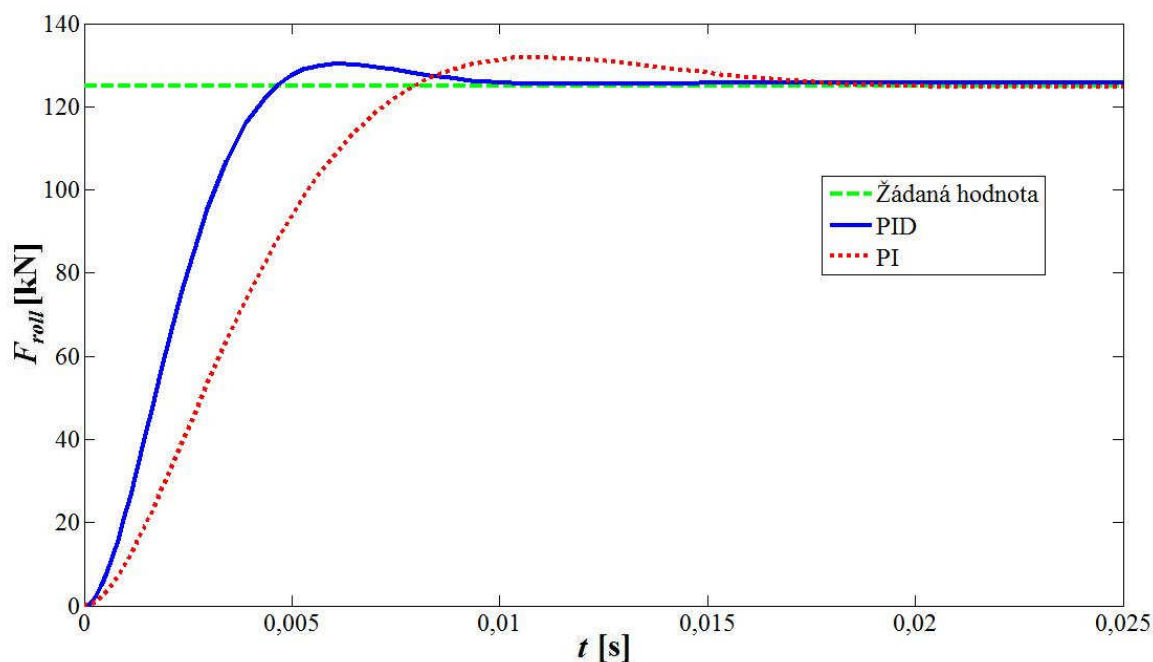


Obrázek 7.11 – Grafické porovnání výstupní válcovací síly v závislosti na čase u regulátorů typu PI:
a) MOMO; b) MPM

V obr. 7.11 je grafické porovnání výstupních válcovacích sil v závislosti na čase u regulátorů typu PI, jejichž stavitelné parametry jsou určeny metodou optimálního modelu (MOM) a metodou požadovaného modelu (MPM). Při použití regulátoru typu PI, jehož parametry jsou vypočteny pomocí MPM, dochází k rychlejší regulaci (z grafu to není moc patrné, ale ve výpočtu parametru regulátoru PI ano) než při použití regulátoru typu PI, jehož parametry jsou vypočteny pomocí MOM. Díky regulátoru PI, jehož stavitelné parametry jsou vypočteny pomocí MPM, se válcovací síla během cca 0,019 s dostává na žádanou hodnotu ($F_{rollC} = 125,05$ kN), což se bez použití regulátoru nepotvrdilo (viz obr. 5.11).

7.6 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ

Porovnání se týká dvou navržených regulátorů. Oba jsou seřizeny metodou optimálního modelu, a to PID a PI. Pro porovnání PID a PI regulátorů byly vytvořeny přechodové charakteristiky v obr. 7.12. Z obr. 7.12 je patrné, že při použití regulátoru typu PID, dochází k rychlejší regulaci než při použití regulátoru typu PI.



Obrázek 7.12 – Porovnání regulátorů typu PID a PI, jejichž parametry jsou určeny metodou optimálního modulu

V případě této soustavy jde o takový sledovací servomechanismus (sloužící k seřízení síly), že se na požadovaných a předpokládaných výsledcích neprojeví vliv kmitání na fyzických částech soustavy. Měření tenzometry vykazuje setrvačnost řádově v tisícinách sekundy, taktéž i časová konstanta převodů je řádově srovnatelná. Daná měření prokazují, že konkrétně užívaný válcovací systém nestihne zareagovat za tak krátký časový interval. Z porovnání regulátorů (obr. 7.12) plyne, že při použití regulátoru PID je regulace sice rychlejší, ale složka D zesiluje šum o vysokých úhlových kmitočtech. Proto pro další řešení předmětné problematiky podle mého názoru dostatečně odpovídá navržený PI regulátor. Odpovídá náročnějším požadavkům současné technologické praxe z hlediska topografie povrchu a více se blíží reálnému procesu. A to z toho důvodu, že reguluje výstupní veličinu F_{roll} , která vypovídá o kvalitě procesu podélného válcování za studena a bude tak následně také dostatečně přesně regulovat žádaný stav topografie povrchu.

8 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo identifikovat vztah mezi technologickými parametry válcovací stolice DUO 210 SVa a topografií povrchu. Ve své disertační práci jsem se zaměřila na hledání vazby mezi hlavními technologickými parametry (tj. úběrem materiálu, válcovací silou, válcovací rychlostí atd.) experimentální válcovací stolice a topografií povrchu. Řešená problematika disertační práce byla podpořena interním grantem SP 2011/76 na Hornicko-geologické fakultě VŠB-TU Ostrava od roku 2011.

Práce vychází z výsledků získaných z topografie povrchů válcovaných plechů z nízkouhlíkové konstrukční oceli PN EN 10263-2:2004, hlubokotažné oceli řady KOHAL o jakosti 697, IF oceli bez intersticií, mikrolegované oceli a refosforizované oceli. Předkládané výsledky dokladují správnost předpokladu, že při zvyšujícím se úběrem Δh se zvyšuje válcovací síla F_{roll} a kvalita válcovaného povrchu se zlepšuje. Experiment byl proveden na laboratorní válcovací stolici DUO 210 SVa, která nemá parametry velkých válcovacích stolic typu 3,5 KVARTO (viz tab. 4.2). Na této válcovací stolici DUO 210 SVa je možno provádět pouze nekontinuální technologii oproti válcovně s kontinuálním úběrem na jednom plechu v několika stupních na válcovacích tratích, v důsledku čehož jsou získané výškové parametry profilu v těsné shodě s predikovanou závislostí (viz tab. 5.17).

Vlastní přínos práce spočívá ve vytvoření matematického modelu (algoritmu) pro predikci technologických parametrů válcovací stolice DUO 210 SVa při změně absolutního úběru Δh a to jak např. pro hlubokotažnou ocel řady KOHAL o jakosti 697 a pro nízkouhlíkovou ocel, tak pro jakýkoliv válcovaný materiál obecně. Na základě algoritmu je možno identifikovat a predikovat okamžitý stav topografie povrchu vzhledem k variabilním technologickým podmínkám. Na základě toho pak jednotlivé hlavní technologické parametry lze vypočítat a graficky vykreslit.

Dalším přínosem je řízení technologických parametrů podle volby absolutního úběru Δh a finální drsnosti Ra , kdy po vytvoření celkového pohledu na mechanismus technologie válcování za studena podle regresní analýzy u referenčního materiálu je možné jednotlivé hlavní technologické parametry vypočítat a v grafu zjistit kalkulované hodnoty hledaného parametru pro zvolený absolutní úběr Δh a pro zvolenou (finální) kvalitu povrchu Ra . Tento princip lze podle potřeby analogickým způsobem rozšířit na řadu dalších požadovaných parametrů a ty opět vyjádřit analyticky a graficky.

Součástí práce je rovněž stanovení výkonu laboratorní válcovací stolice DUO 210 SVa a válcovací stolice typu 3,5 KVARTO. Výkon je určen nejenom pro diskrétní válcování (pro jeden stupeň válcování), ale také pro kontinuální válcování, a to podle počtu stupňů (podle počtu válcovacích stolic na válcovací trati) při změně úběru v závislosti na čase. V dalším období předpokládám verifikaci dosažených teoretických výsledků jejich aplikací na rozšířeném souboru materiálů a vzorků.

A pro komplexní pohled na danou problematiku je součástí práce také provedení návrhu zpětnovazebního řízení podle vypočtených parametrů podélného válcování zastudena na základě průběžného měření velikosti válcovací síly. Řídicím systémem je zajištěna regulace rychlosti válcování a tím i regulace finální drsnosti povrchu válcovaného plechu, která je ve funkčním vztahu k válcovací síle. Pro tento účel je navržen regulační obvod a vybrán vhodný PI regulátor. Návrh je ověřen v simulačním prostředí Matlab-

Simulink. Výsledky splňují teoretické předpoklady i požadavky současné technologické praxe v oblasti topografie finálního povrchu.

Ve spolupráci s firmou Measurement Technic Moravia Ltd. v rámci programu „Podpora vědy a výzkumu v Moravskoslezském kraji 2011“ Dotační titul 3 je zajištěna realizace projektu „Návrh bezkontaktního způsobu měření topografie povrchu vytvořeného vícenásobnou plastickou deformací“, jehož výstupem je vytvoření nové metody hodnocení topografie povrchů vzniklých vícenásobnou plastickou deformací.

Rovněž ve spolupráci s Measurement Technic Moravia Ltd. v rámci programu „Podpora vědy a výzkumu v Moravskoslezském kraji 2012“ Dotační titul 3 bude zajištěna realizace projektu „Identifikace vztahu topografie povrchu materiálu k podélnému válcování za studena“, jehož výstupem bude vyhodnocení válcovaného materiálu prostřednictvím obrazové (spektrální) analýzy 2D a 3D topografie povrchu a vytvoření nového hodnocení topografie povrchu pro identifikaci a predikci okamžitých stavů topografie povrchu vzhledem k variabilním technologickým podmínkám. A navíc na základě parametrů povrchu lze využít funkční vztahy k projektování hlavních technologických parametrů prezentovaných ve výše uváděných původních algoritmech.

Závěrem lze říci, že všechny dílčí cíle stanovené disertační prací byly splněny. Na základě analýzy dat z experimentálních vzorků, bylo možné navrhnout algoritmus. Navržený matematický model (algoritmus) se ukázal vhodným v praxi, kdy po zadání vstupních materiálových údajů vyhotoví komplexní matematický model procesu v numerické i grafické formě. Z grafu lze pak zjistit kalkulované hodnoty hledaného parametru pro zvolený absolutní úběr Δh a pro zvolenou (finální) kvalitu povrchu Ra . Tento princip lze podle potřeby analogickým způsobem rozšířit na řadu dalších požadovaných parametrů a ty opět vyjádřit analyticky a graficky.

9 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

A. Tištěné zdroje:

- [1] ALSAMHAN, A; PILLINGER, I; HARTELY, P. The development of real time re-meshing technique for simulating cold-roll-forming using FE methods. *Journal of Materials Processing Technology* 147, Elsevier, 2004, p. 1-9. ISSN 0924-0136
- [2] BALÁTEĚ, J. *Automatické řízení*. Praha. Technická literatura BEN, 2003. ISBN 80-7300-020-2
- [3] BIDULSKÁ, J; KVAČKAJ, T; BODÁK, V; BIDULSKÝ, R. *The microgeometry parameters of uncoated and zinc-coated cold rolled steel strips*. Journal of Metals, Materials and Minerals, 2007, Vol. 17, No. 2, p. 1-7. ISSN 0857-6149
- [4] BIDULSKÁ, J; KVAČKAJ, T; BODÁK, V; RAKUČIAK, R; BIDULSKÝ, R. *Mikrogeometria povrchu pozinkovaných karosárskych plechov*. Hutnícke listy, 2002, Vol. 57, No. 1-3, p. 8-10. ISSN 0018-8069
- [5] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989. ISBN 04-252-89
- [6] ČSN EN ISO 4287 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu, Praha, ČNI, 1999
- [7] FOREJT, M; PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno. Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374
- [8] GINZBURG, V. B. *Flat-rolled Steel Processes*. Boca Raton, 2009, CRC Press. ISBN 978-1-4200-7292-1
- [9] GINZBURG, V. B. *Steel-rolling Technology-theory and practice*. Boca Raton, 1989, CRC Press. ISBN 0-8247-8124-4
- [10] KENMOCHI, K; YARITA, I; ABE, H; FUKUHARA, A; KOMATU, T; KAITO, H. Effect of micro-defects on the surface brightness of cold-rolled stainless-steel strip. *Journal of Materials Processing Technology* 69, Elsevier, 1997, p. 106-111. ISSN 0924-0136
- [11] KOLLEROVÁ, M; ŽÍDEK, M; POČTA, B; DĚDEK, V. *Valcovanie*. Bratislava. Alfa, 1991. ISBN 80-05-00729-9
- [12] KRSEK, A; OSANA, H. P; KURIC, I; PROSTREDNÍK, D. *Strojárska metrológia a riadenie kvality*. Bratislava. STU, 1998. ISBN 80-227-1025-3
- [13] KVAČKAJ, T; MAMUZIĆ, I; Development of bake hardening effect by plastic deformation and annealing conditions. *METABK* 45 (1), 2006, p. 51-55. ISSN 0543-5846
- [14] LENARD, J. G. *Primer on Flat Rolling*. London, Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08-045319-4

- [15] MIŠIČKO, R; KVAČKAJ, T; VLADO, M; GULOVÁ, L; LUPTÁK, M; BIDULSKÁ, J. Defects simulation of rolling strip. *Materials Engineering*, 2009, vol. 16, no. 3, p. 7-12. ISSN 1335-0803
- [16] NOVÁK, Z. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum*, 2011, no. 11, p. 52-54. ISSN 1212-2572
- [17] ODUGUWA, V; ROY, R. A Review of Rolling System Design Optimisation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, 2006, Vol. 46, No. 7-8, p. 912-928. ISSN 0890-6955
- [18] OHLÍDAL, M; PÁLENÍKOVÁ, K. Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při 3D hodnocení kvality povrchu. *Jemná mechanika a optika*, 2004, roč. 49, č. 9, s. 251-259. ISSN 0447-6441.
- [19] OTHMANI, A; KAMINSKY C. Three dimensional fractal analysis of sheet metal surfaces. *Wear* 214. Elsevier, 1998, p. 147-150. ISSN 0043-1648
- [20] PITTNER, J; SIMAAN, M. A. *Tandem Cold Metal Rolling Mill Control*. London, Springer, 2011. ISBN 978-0-85729-067-0
- [21] SYNEK, M. a kolektiv. *Manažerská ekonomika 4., aktualizované a rozšířené vydání*.: Praha. Grada Publishing, a.s., 2007. ISBN 978-80-247-1992-4
- [22] SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; VLADO, M; HLAVÁČEK, P; LUPTÁK, M; PÁLENÍKOVÁ, K; KUŠNEROVÁ, M. Měření topografie povrchů vytvořených podélným válcováním za studena. *Jemná mechanika optika*, 2010, roč. 55, č. 2., s. 40-41. ISSN 0447-6441
- [23] SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; HLAVÁČEK, P; KUŠNEROVÁ, M; HLOCH, S; FUSEK, M; ČEPOVÁ, L. Measurement, analysis and interpretation of surface topography created by a cold rolling. *Technologické inženýrství*, 2009, Vol. 6, No. 2, p. 67-70. ISSN 1336 – 5967
- [24] SZARKOVA, V; VALÍČEK, J; ŘEPKA, M; HARNIČAROVÁ, M; SPURNÝ, M; KAWULOK, P; ROKOSZ, K; KUBĚNA, V. New approach for evaluating the surface topography of rolled sheets. *17th International Conference Engineering Mechanics 2011*
- [25] SZARKOVA, V; VALÍČEK, J; KUŠNEROVÁ, M; HALUZÍKOVÁ, B; ZELENÁK, M; KUBĚNA, V. Měření topografie povrchu válcovaného plechu optickou metodou. *Hutnické listy*, 2011, č. 3, roč. 64, p. 72-75. ISSN 0018-8069
- [26] SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; KOZAK, D; HLOCH, S; HLAVÁČEK, P; VLADO, M; ROKOSZ, K; HARNIČAROVÁ, M; WENGLORZOVÁ, A; LUPTÁK, M. Influence of longitudinal cold rolling on the surface topography of low carbon structural steel. *Metaurgija*, 2012, Vol. 51, No. 3. ISSN 0543-5846 (v tisku)
- [27] UNDERWOOD, L. R. *The rolling of metals*. London. Chapman & Hall LTD., 1952
- [28] VALIEV, R. Z., ESTRIN, Y., HORITA, Z. et al. Producing bulk ultrafine grained materials by severe plastic deformation. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2006, vol. 58, no. 4, p. 33-39. ISSN 1047-4838

- [29] VALÍČEK, J. *Snímání kvality povrchu materiálů pro řízení technologie kapalinového paprsku*. Doktorská práce. Ostrava, VŠB-TUO, 2003, s. 92
- [30] VALÍČEK, J. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu*. Habilitační práce. Ostrava, VŠB-TUO, 2008, s. 116
- [31] VALÍČEK, J; HLOCH, S; KOZAK, D. *Study of Surface Topography Created by Abrasive Waterjet Cutting*. Slovanski Brod, Strojarski fakultet u Slovanskom Brodu, 2009. ISBN 978-953-6048-48-9
- [32] VALÍČEK, J; MÜLEROVÁ, J; SZARKOVÁ, V; ROKOSZ, K; ŁUKIANOWICZ, C; KOZAK, D; KOŠTIAL, P; HARNIČÁROVÁ, M. New procedure for determination of main technological parameters of rolling mill. New procedure for determination of main technological parameters of rolling mill. *5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, ACEX2011 – ABSTRACT BOOK*, 2011
- [33] VÍTEČKOVÁ, M; VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. Ostrava. Vydavatelství VŠB – Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2
- [34] VOITH, M; DERNEI, L; VOITH, K. Complex optimisation of cold strip rolling. *Dimensional control in rolling mills: 5th International Rolling Conference*, 1990. ISBN 0901716219
- [35] ZELENÁK M. et al. Analogy of abrasive waterjet technology with classical technologies. *Technologické inženýrstvo*, 2009, Vol. 6, No. 2. ISSN 1336-5967
- [36] ZIMOVČÁK, P; HRABČÁKOVÁ, L; ČERNÍK, M. Mikroštruktura vlastnosti vysokopevných IF ocelí. *METAL 2008*
- [37] ZRNÍK, J., DOBATKIN, S. V., MAMUZIČ, I. Processing of metals by severe plastic deformation (SPD) – structure and mechanical properties respond. *Metalurgija* 47 (2008) 3, p. 211 – 216. ISSN 0543-5846
- [38] ŽÍDEK, M; DĚDEK, V; SOMMER B. *Tváření oceli*. Praha. SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-408-88
- [39] LECO, uživatelský manual
- [40] Mitutoyo, uživatelský manual
- [41] Technická zpráva č. Z – 614/11 z VÚHŽ Dobrá
- [42] Technická zpráva z U.S. Steel Košice, s.r.o.

B. Elektronické zdroje:

- [43] URL:<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#011> [citováno 2010-02-16]
- [44] URL:<http://195.178.89.122/CAAC_PHP/CAAC/cesky/synteza/koptmod/koptmod.php> [citováno 2012-02-07]
- [45] URL:< <http://www.vitkovicesteel.com/technicka-vybavenost/>> [citováno 2011-10-01]
- [46] URL:<<http://katedry.fmfi.vsb.cz/UMRTP/czech/studena.htm>> [citováno 2012-02-07]

[47] URL:<<http://gwyddion.net/>> [citováno 2012-04-10]

[48] URL:< <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/08Pretvar%20Odpor.pdf>> [citováno 2012-04-18]

C. Seznam vlastních prací:

1. SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; VLADO, M; HLAVÁČEK, P; LUPTÁK, M; PÁLENÍKOVÁ, K; KUŠNEROVÁ, M. Měření topografie povrchů vytvořených podélným válcováním za studena. *Jemná mechanika optika*, 2010, roč. 55, č. 2., s. 40-41. ISSN 0447-6441
2. SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; HLAVÁČEK, P; KUŠNEROVÁ, M; HLOCH, S; FUSEK, M; ČEPOVÁ, L. Measurement, analysis and interpretation of surface topography created by a cold rolling. *Technologické inženýrství*, 2009, Vol. 6, No. 2, p. 67-70. ISSN 1336 – 5967
3. SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; ŘEPKA, M; HARNIČÁROVÁ, M; SPURNÝ, M; KAWULOK, P; ROKOSZ, K; KUBĚNA, V. New approach for evaluating the surface topography of rolled sheets. *17th International Conference Engineering Mechanics 2011*, p. 579-582. ISBN 978-80-87012-33-8
4. SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; KUŠNEROVÁ, M; HALUZÍKOVÁ, B; ZELENÁK, M; KUBĚNA, V. Měření topografie povrchu válcovaného plechu optickou metodou. *Hutnické listy*, 2011, č. 3, roč. 64, p. 72-75. ISSN 0018-8069
5. SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; KOZAK, D; HLOCH, S; HLAVÁČEK, P; VLADO, M; ROKOSZ, K; HARNIČÁROVÁ, M; WENGLORZOVÁ, A; LUPTÁK, M. Influence of longitudinal cold rolling on the surface topography of low carbon structural steel. *Metaurgija*, 2012, Vol. 51, No. 3. ISSN 0543-5846 (v tisku)
6. HLAVÁČEK, P; VALÍČEK, J; BRUMEK, J; ZELENÁK, M; HALUZÍKOVÁ, B; HARNIČÁROVÁ, M; SZARKOVÁ, V. Use of the indentation tests for the evaluation of machinability of materials during abrasive waterjet cutting. *Chemické listy*, 2011, vol. 105, no. 17, p. 735-738. ISSN 1213-7103
7. ZELENÁK, M; VALÍČEK, J; BRUMEK, J; HLAVÁČEK, P; HALUZÍKOVÁ, B; VYLEŽÍK, M; BÁBKOVÁ, P; HARNIČÁROVÁ, M; SZARKOVÁ, V; KUŠNEROVÁ, M; KUBĚNA, V. Measurement and analysis of the hardnesses of aluminium surface layers by the nanoindentation and scratch tests. *Chemické listy*, 2011, vol. 105, no. 17, p. 688-691. ISSN 1213-7103
8. VALÍČEK, J; MÜLEROVÁ, J; SZARKOVÁ, V; ROKOSZ, K; ŁUKIANOWICZ, C; KOZAK, D; KOŠTIAL, P; HARNIČÁROVÁ, M. New procedure for determination of main technological parameters of rolling mill. *5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, ACEX2011 – ABSTRACT BOOK*, 2011
9. VALÍČEK, J; MÜLEROVÁ, J; SZARKOVÁ, V; ROKOSZ, K; ŁUKIANOWICZ, C; KOZAK, D; KOŠTIAL, P; HARNIČÁROVÁ, M. New procedure for determination of main technological parameters of rolling mill. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Springer, 2012, ISSN 0935-1175 (v tisku)

10. VŠB-TU OSTRAVA. *Roll-Surf-Analysis*. Původci: ŽIDLÍK, P; SZARKOVÁ, V; VALÍČEK, J; BRUMEK, J. Česká republika. Software RIV/61989100:27360/10:86075838. 30.5.2011
11. VŠB-TU OSTRAVA. *Zařízení pro identifikaci válcovací síly* Původci: VALÍČEK, J; FUSEK, M; FOJTÍK, F; SZARKOVÁ, V. Česká republika. Funkční vzorek ev. č.: 207/22-12-2011_F. 22.12.2011

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Metalografické výbrusy z nízkouhlíkové oceli

Příloha 2 – Metalografické výbrusy z hlubokotažné oceli

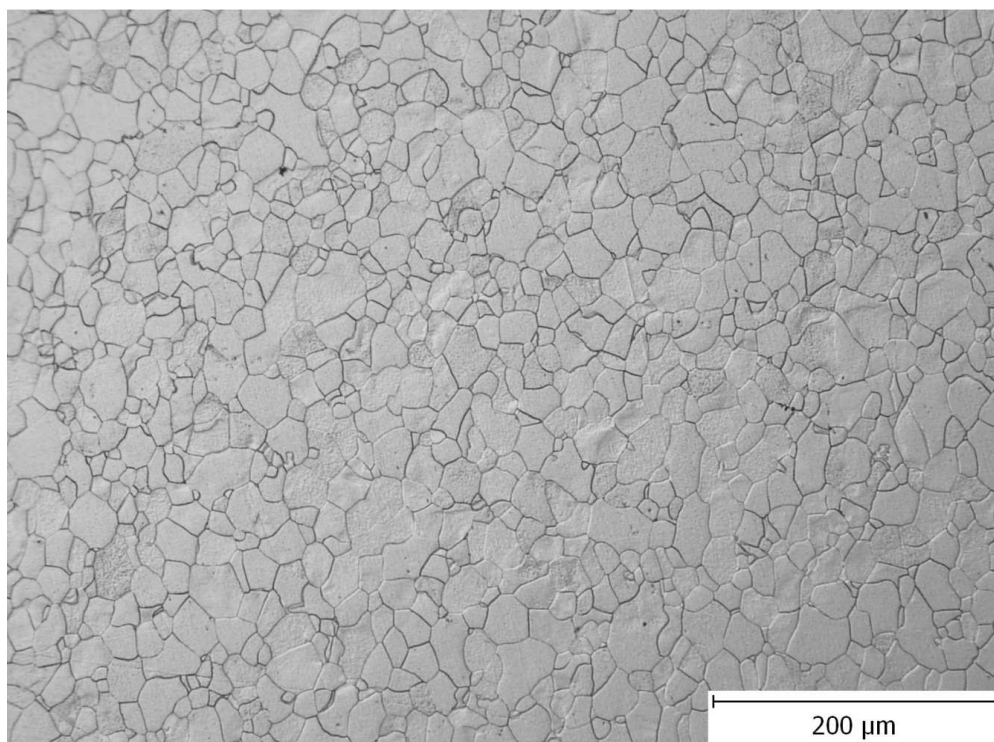
Příloha 3 – Diagramy pro zkoušku tahem

Příloha 4 – Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli

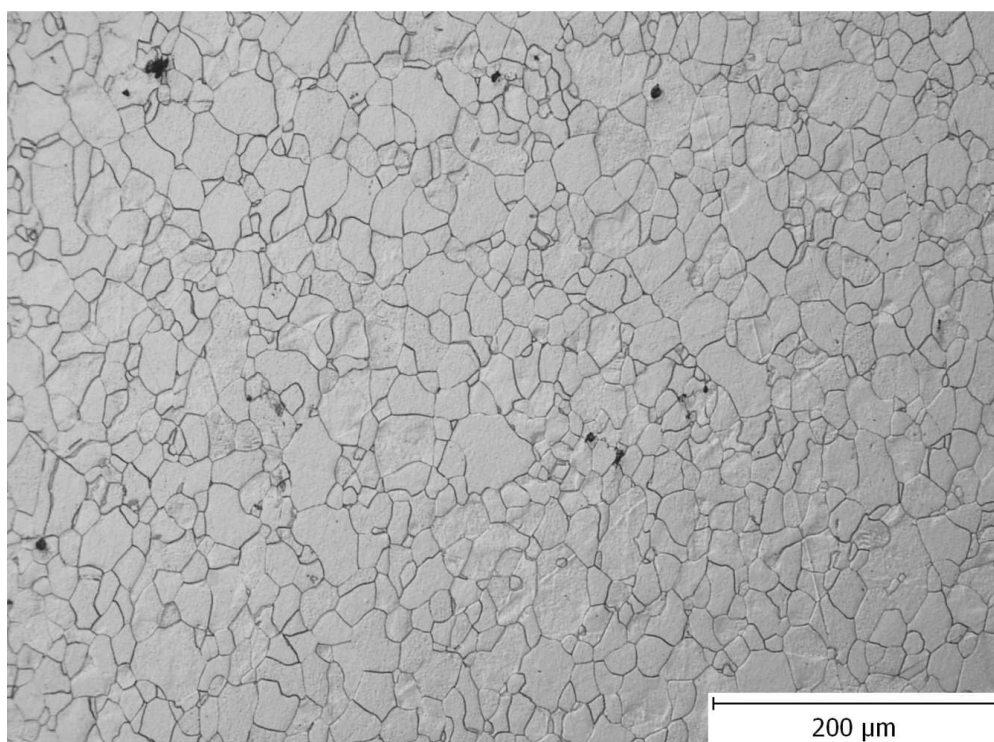
Příloha 5 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu z nízkouhlíkové oceli

Příloha 6 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu z hlubokotažné oceli

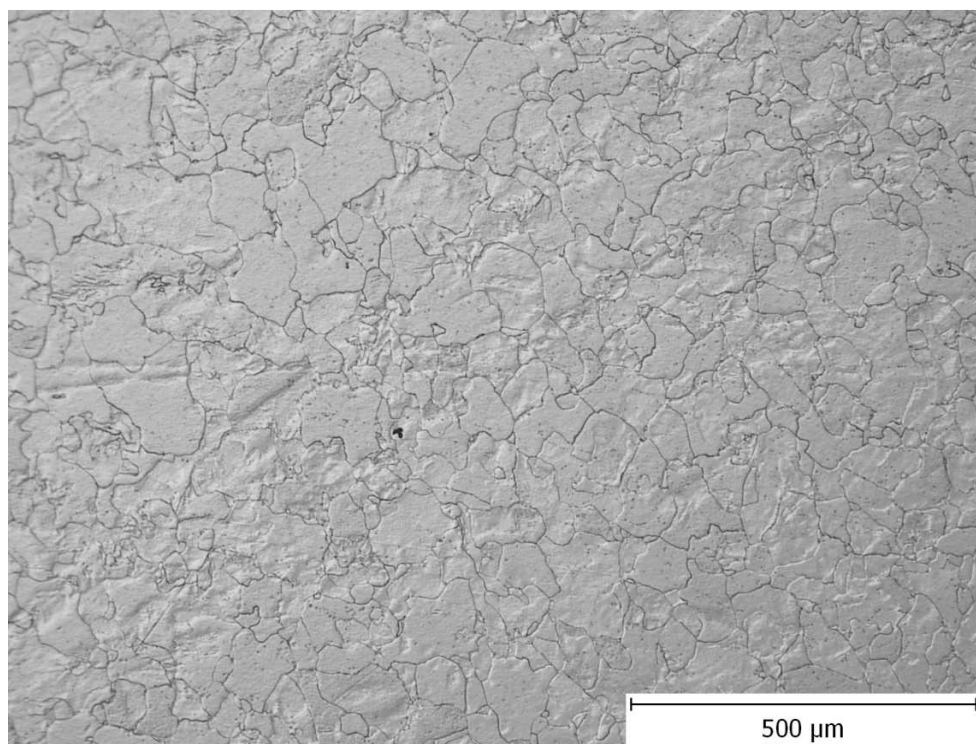
Příloha 1 – Metalografické výbrusy z nízkouhlíkové oceli



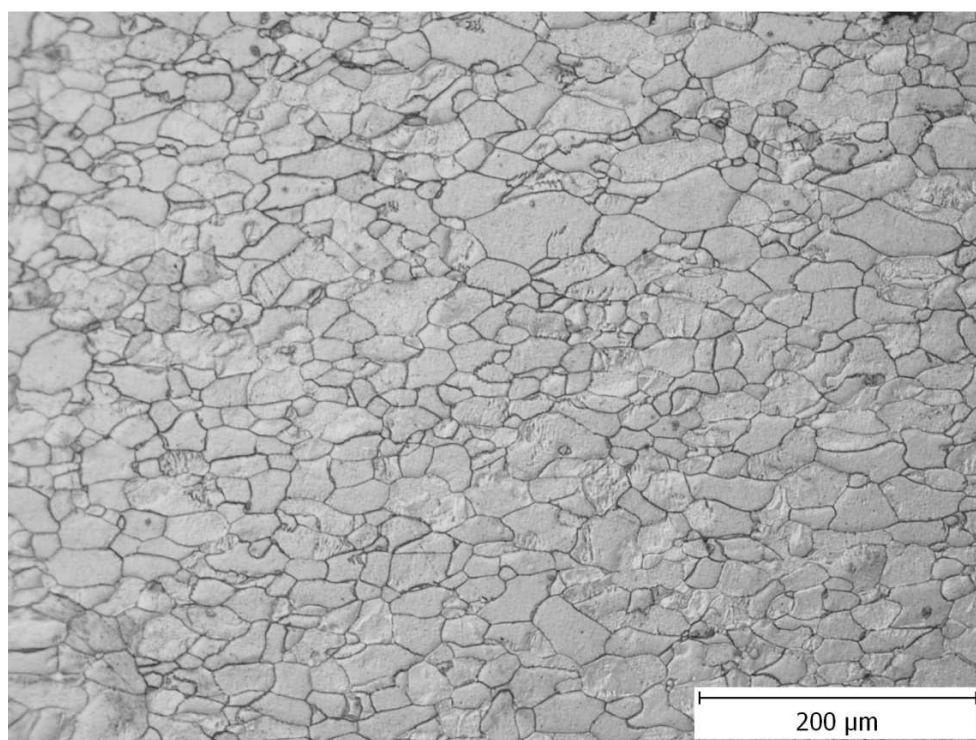
Obrázek 1 – Metalografický výbrus materiálu 1A



Obrázek 2 – Metalografický výbrus materiálu 2A

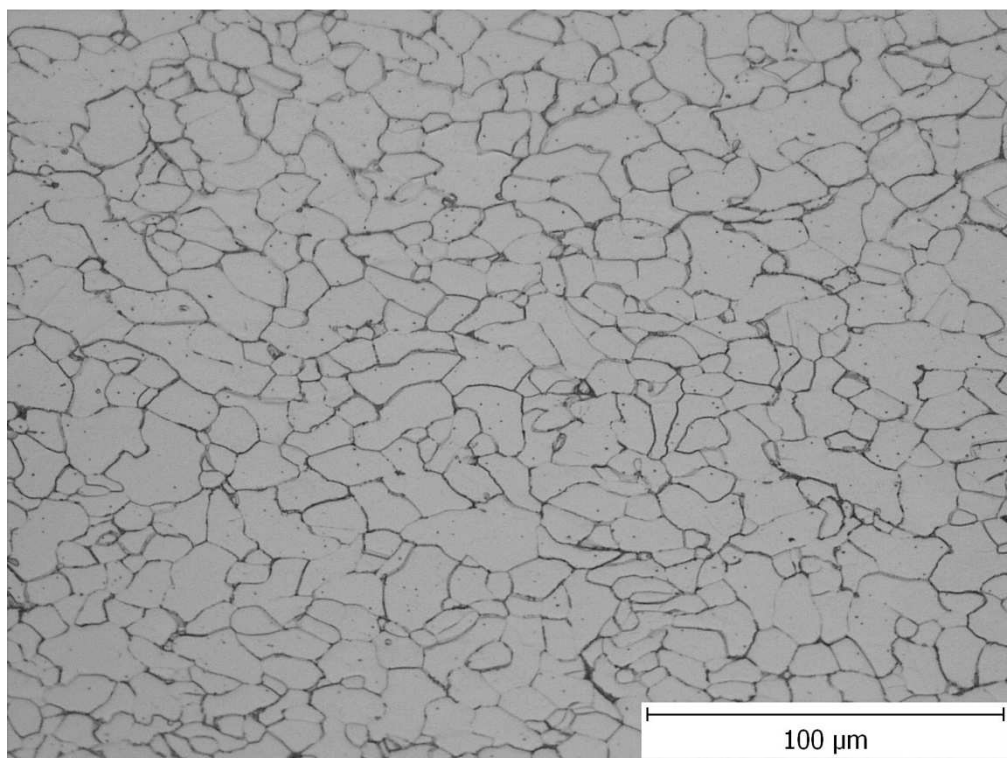


Obrázek 3 – Metalografický výbrus materiálu 3A

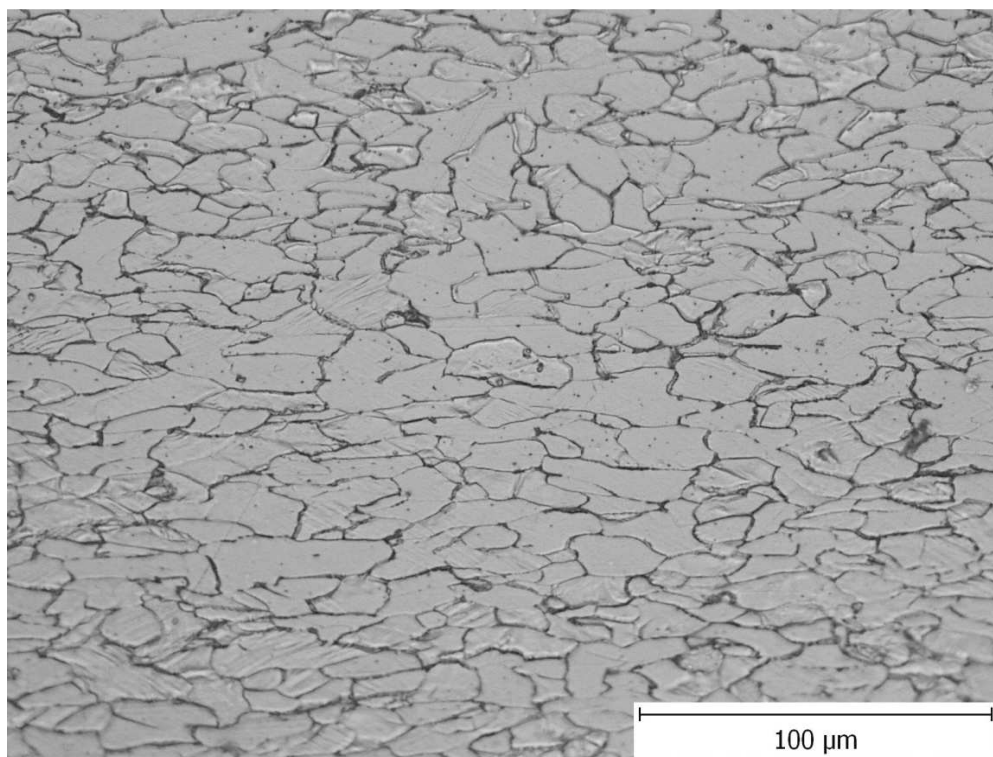


Obrázek 4 – Metalografický výbrus materiálu 4A

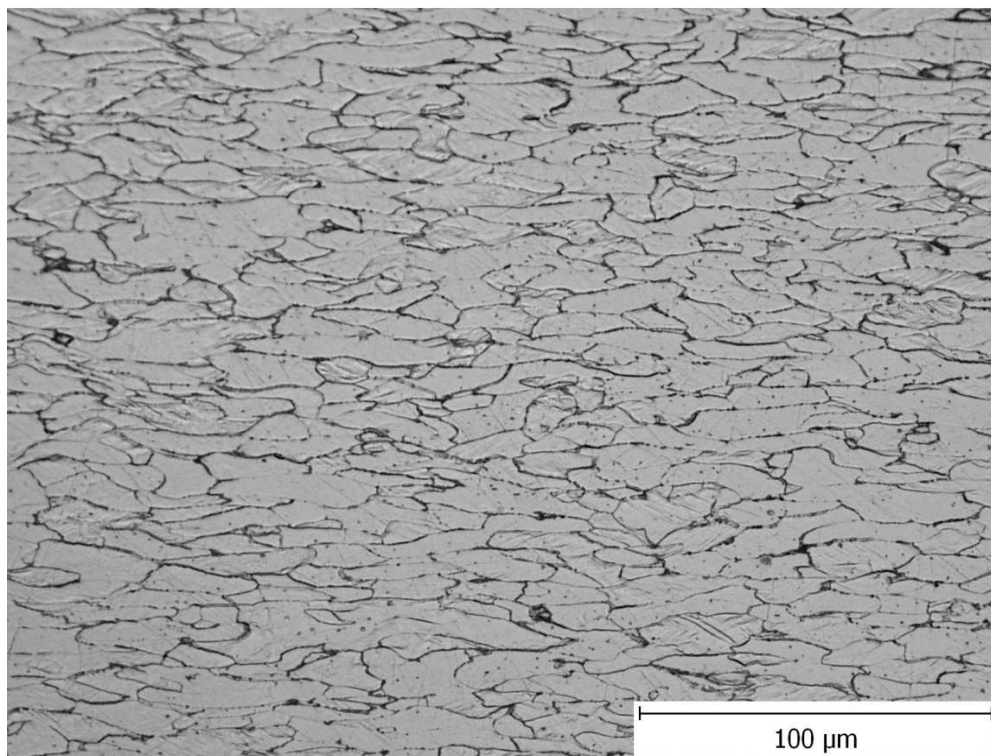
Příloha 2 – Metalografické výbrusy z hlubokotažné oceli



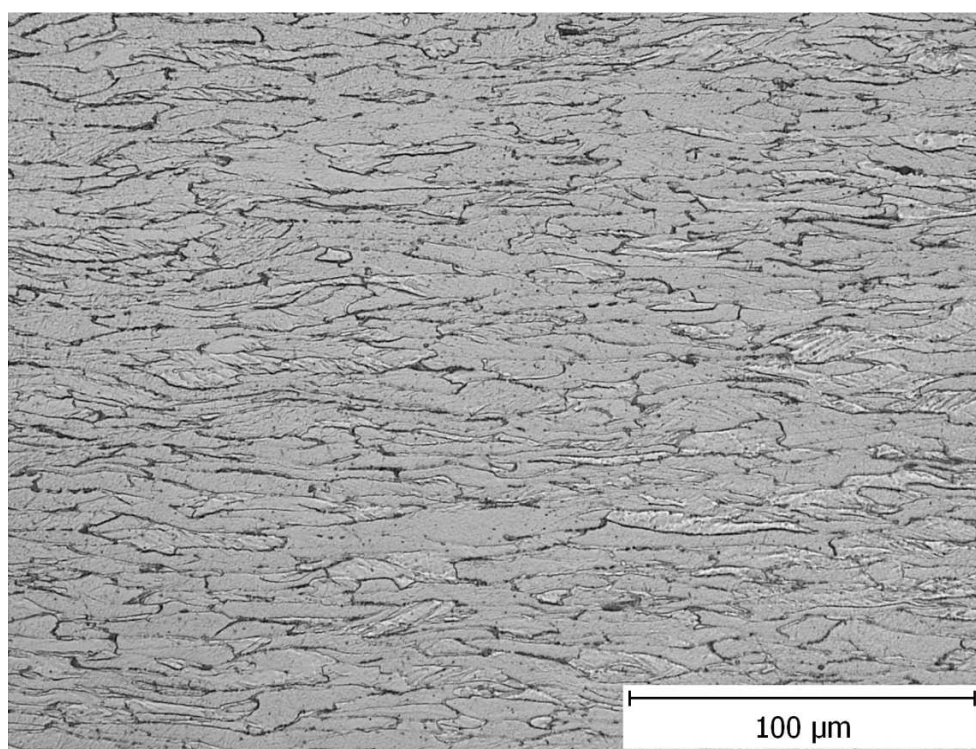
Obrázek 5 – Metalografický výbrus materiálu 1C



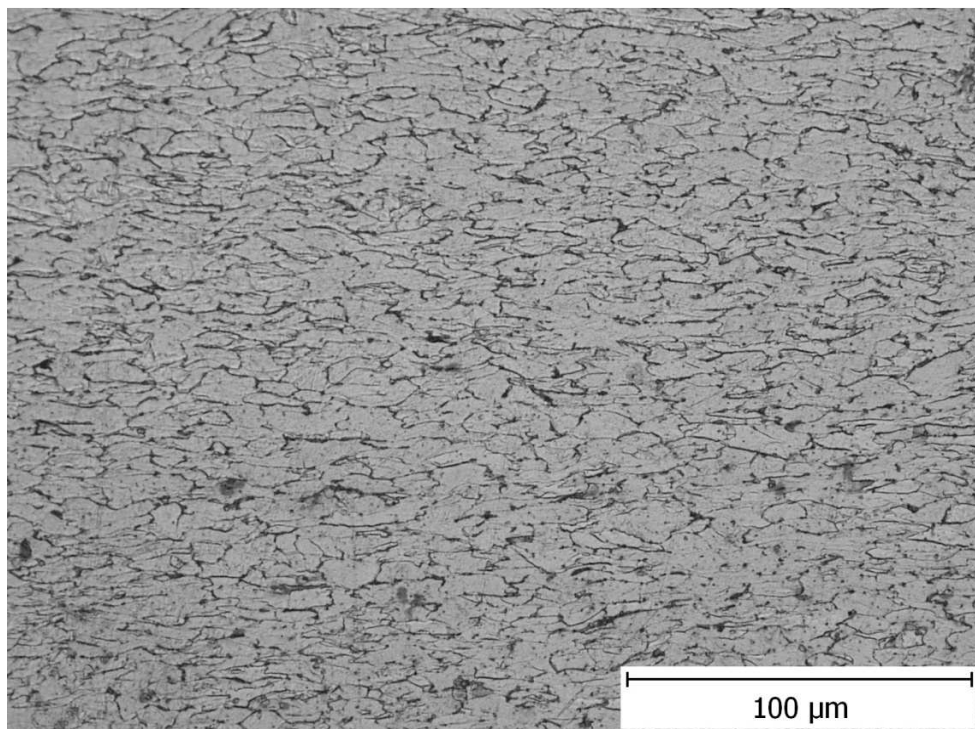
Obrázek 6 – Metalografický výbrus materiálu 2C



Obrázek 7 – Metalografický výbrus materiálu 3C



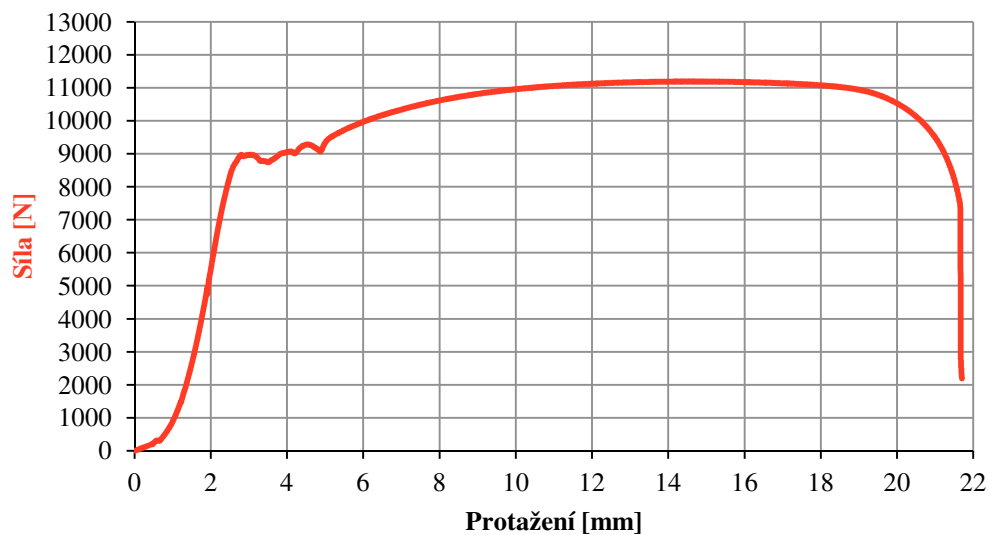
Obrázek 8 – Metalografický výbrus materiálu 4C



Obrázek 9 – Metalografický výbrus materiálu 5C

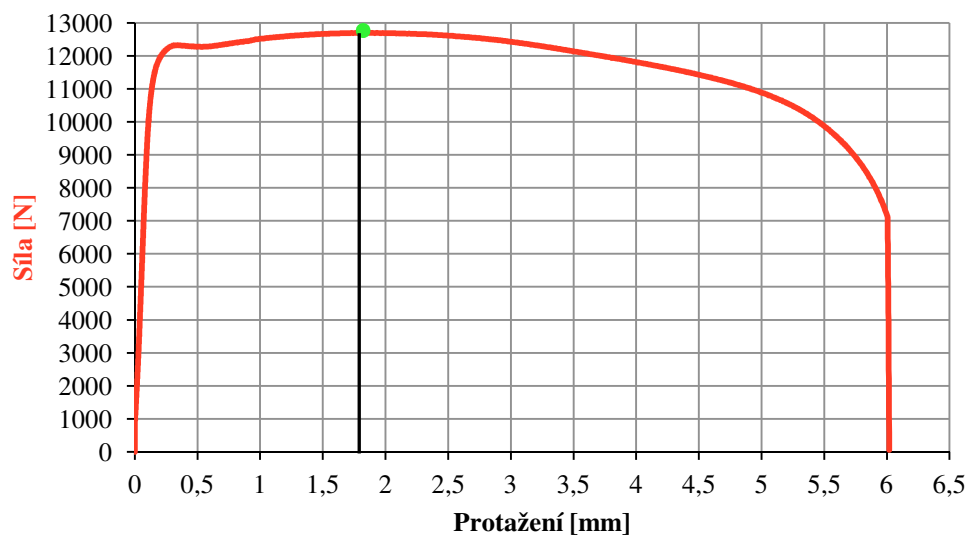
Příloha 3 – Diagramy pro zkoušku tahem

Tahová zkuška kovu - EN 10002



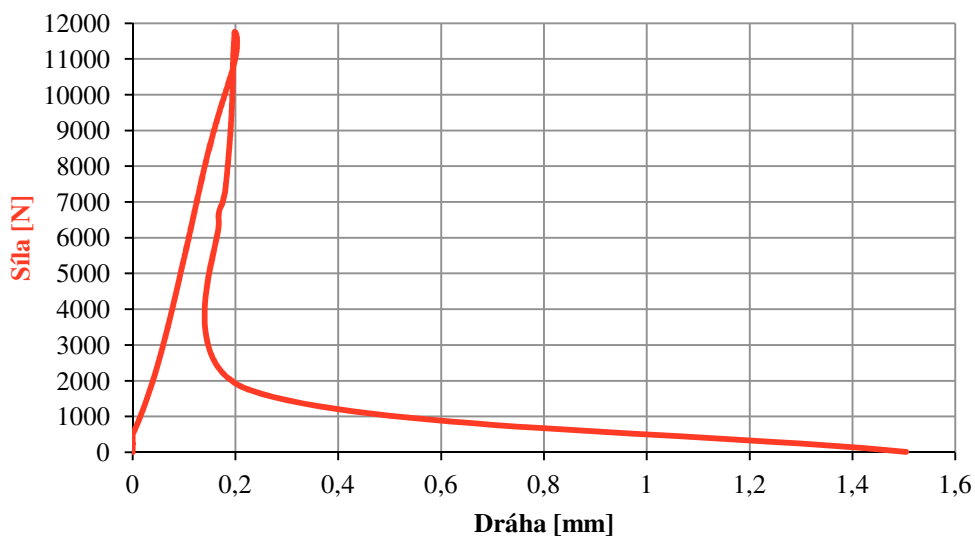
Obrázek 10 – Diagram tahové zkoušky materiálu 0C

Tahová zkuška kovu - ISO 6892-1



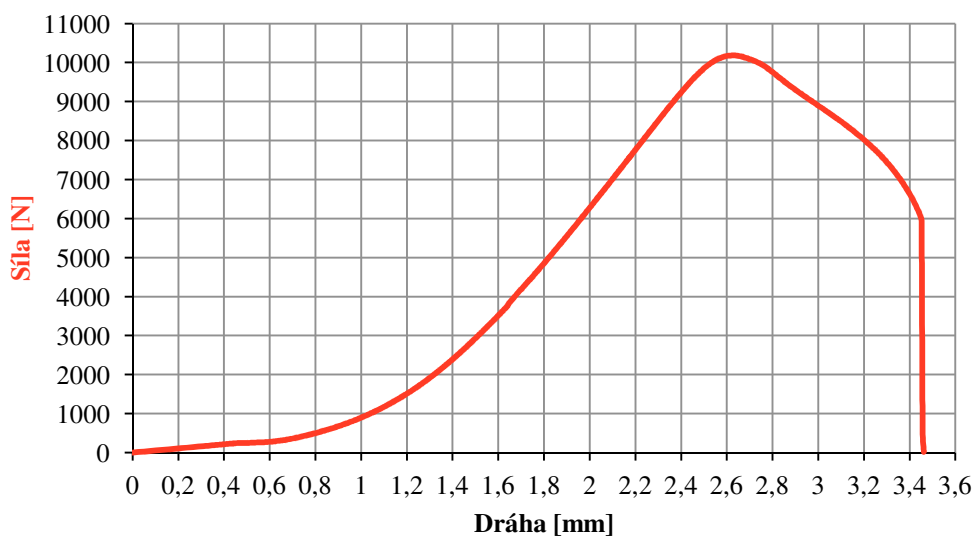
Obrázek 11 – Diagram tahové zkoušky materiálu 1C

Tahová zkušba kovu - ISO 6892-1



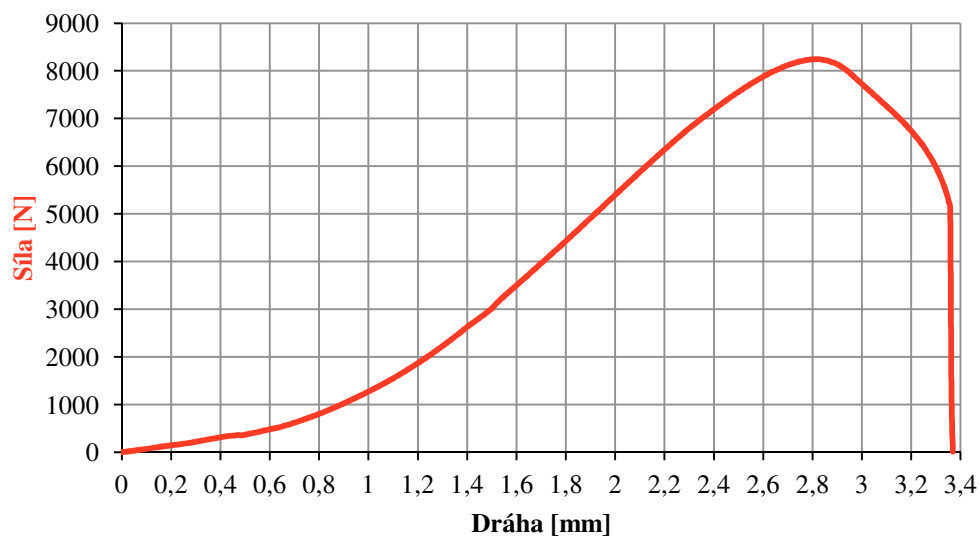
Obrázek 12 – Diagram tahové zkoušky materiálu 2C

Tahová zkušba kovu - ISO 6892-1



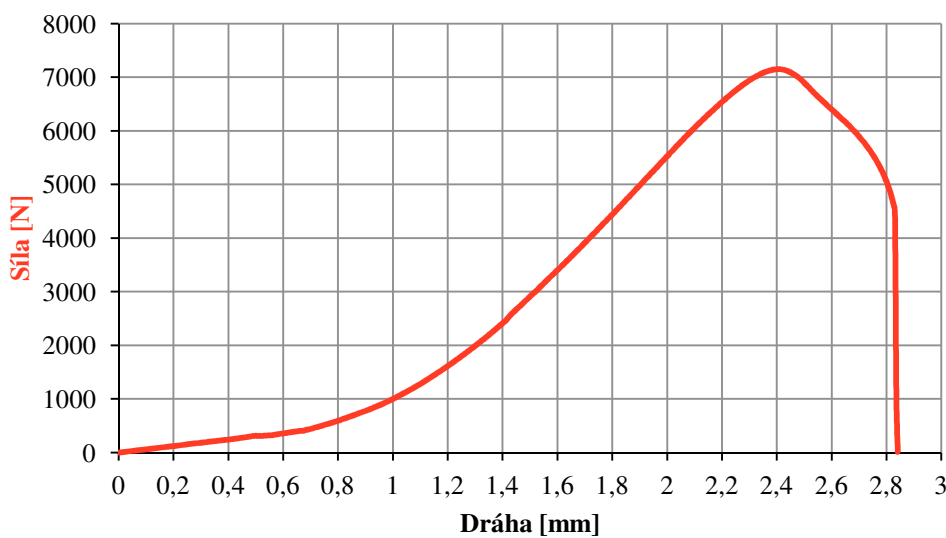
Obrázek 13 – Diagram tahové zkoušky materiálu 3C

Tahová zkuška kovu - ISO 6892-1



Obrázek 14 – Diagram tahové zkoušky materiálu 4C

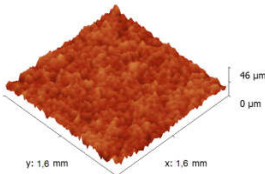
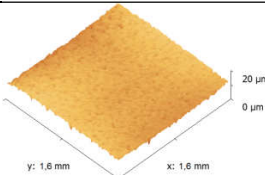
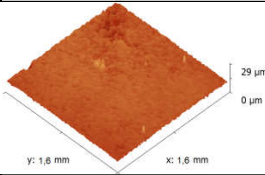
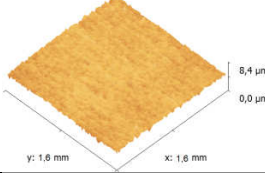
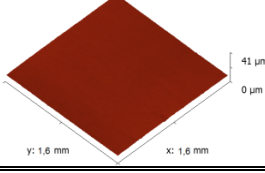
Tahová zkuška kovu - ISO 6892-1



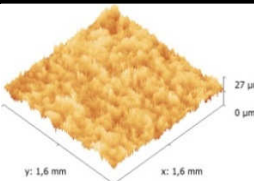
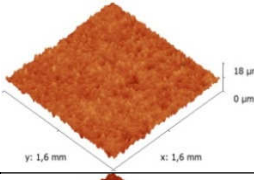
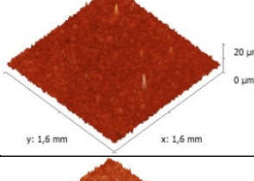
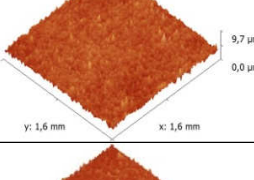
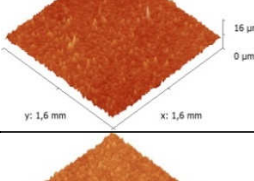
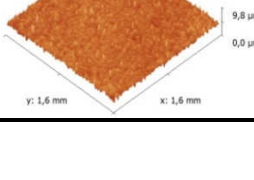
Obrázek 15 – Diagram tahové zkoušky materiálu 5C

Příloha 4 - Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z nízkouhlíkové a hlubokotažné oceli

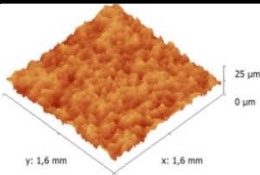
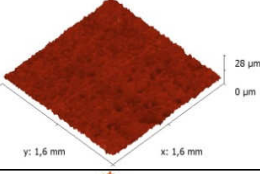
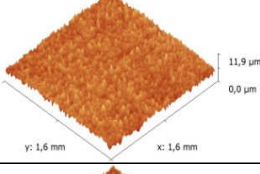
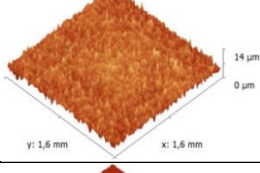
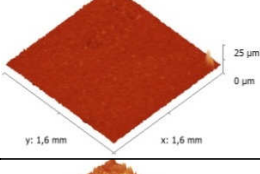
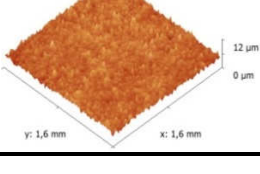
Tabulka 1 – Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z nízkouhlíkové oceli

Označení plechu	Δh [mm]	3D topografie povrchu
0A	-	
1A	0,4	
2A	0,5	
3A	0,6	
4A	0,8	

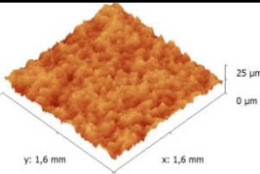
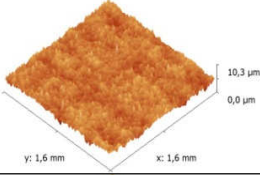
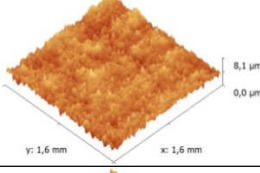
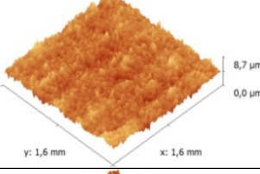
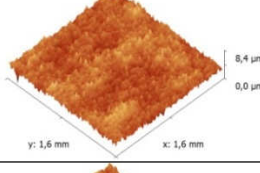
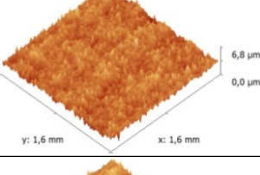
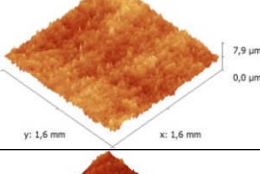
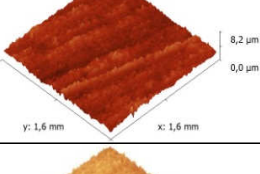
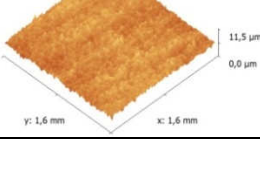
Tabulka 2 – Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z hlubokotažné oceli vyprodukované při $v_{roll} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

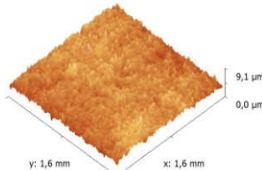
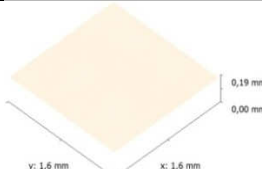
Označení plechu	$\Delta h[\text{mm}]$	3D topografie povrchu
0C	-	
1C	0,38	
2C	0,96	
3C	1,27	
4C	1,56	
5C	1,73	

Tabulka 3 – Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z hlubokotažné oceli vyrobené při $v_{roll} = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

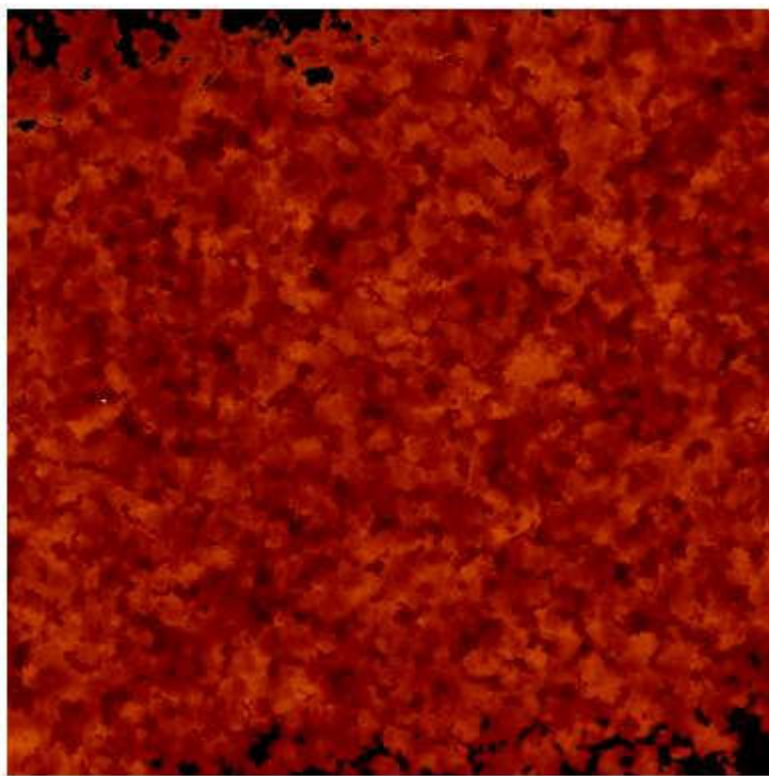
Označení plechu	$\Delta h[\text{mm}]$	3D topografie povrchu
0D	-	
1D	0,31	
2D	0,85	
3D	1,14	
4D	1,65	
5D	1,79	

Tabulka 4 – Detailní zobrazení 3D topografie povrchu z hlubokotažné oceli vyprodukované válcovací stolicí Q110

Označení plechu	Δh [mm]	3D topografie povrchu
0E	-	
1E	0,25	
2E	0,57	
3E	0,75	
4E	0,94	
5E	1,20	
6E	1,35	
7E	1,57	
8E	1,65	

9E	1,72	
10E	1,98	

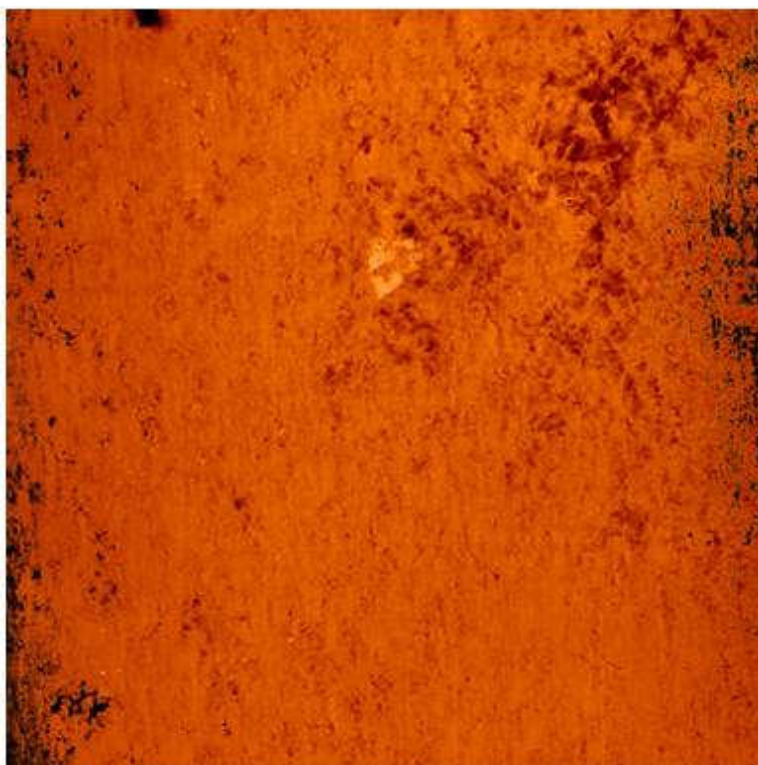
Příloha 5 - Detailní zobrazení 2D topografie povrchu z nízkouhlíkové oceli



Obrázek 16 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 0A



Obrázek 17 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 1A



Obrázek 18 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 2A

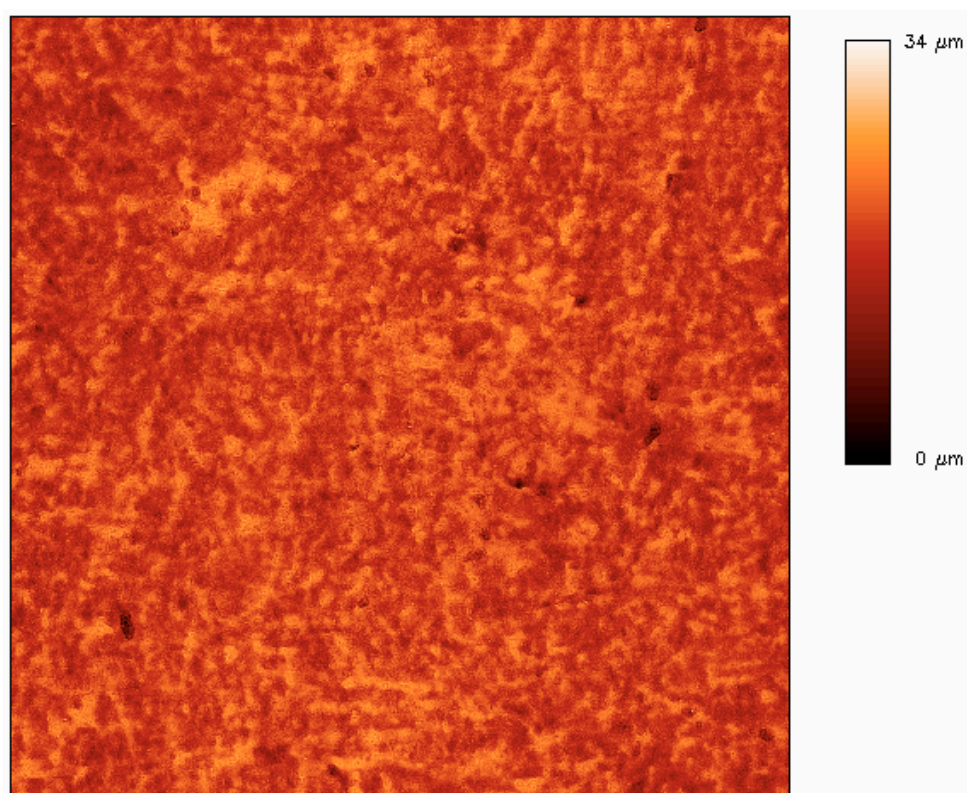


Obrázek 19 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 3A

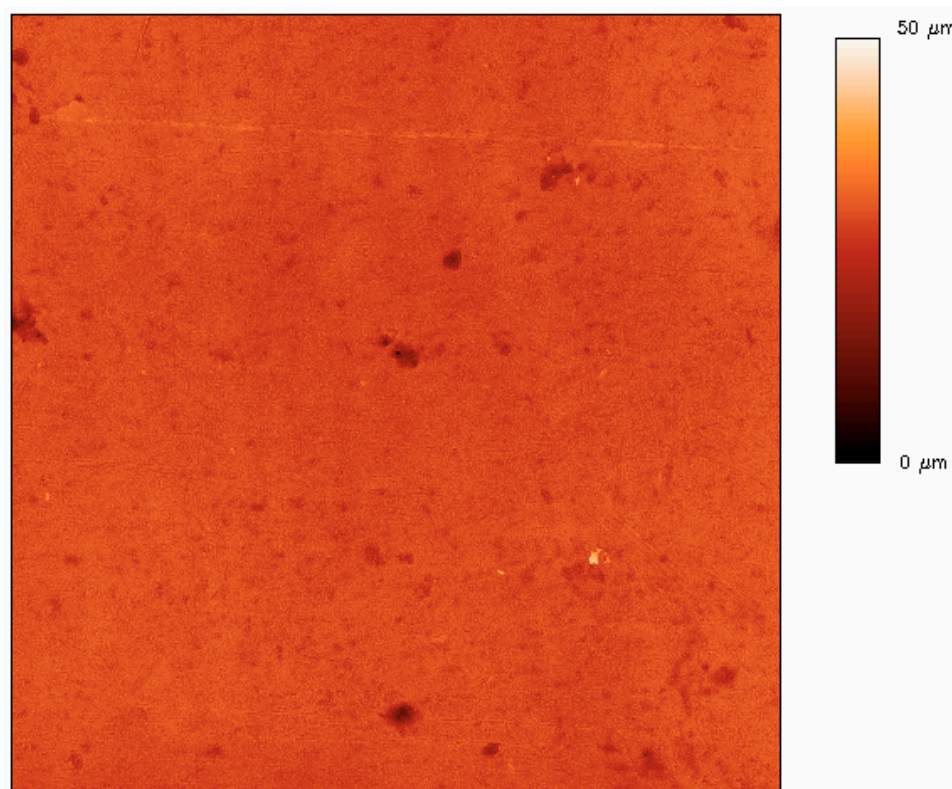


Obrázek 20 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 4A

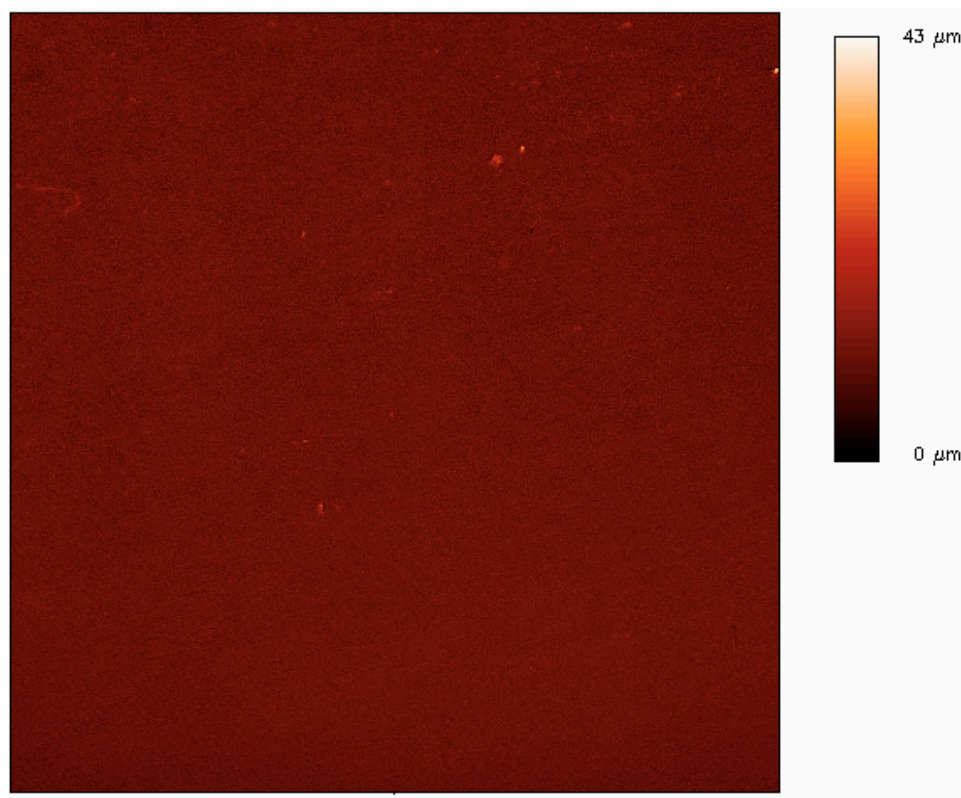
Příloha 6 - Detailní zobrazení 2D topografie povrchu z hlubokotažné oceli



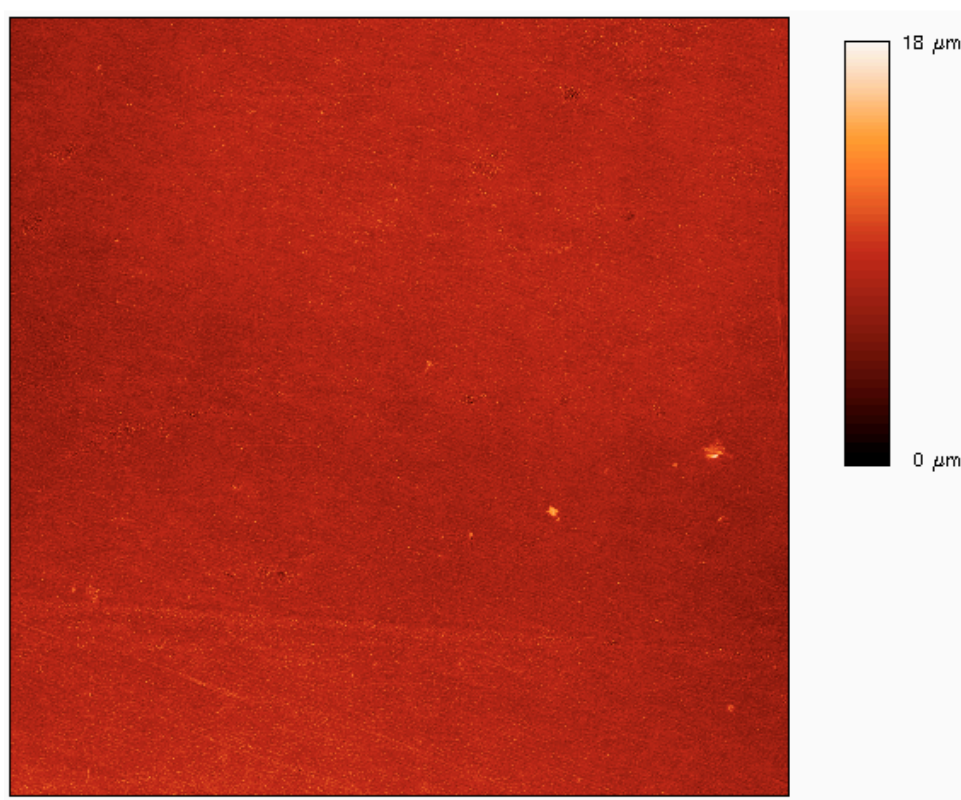
Obrázek 21 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 0C



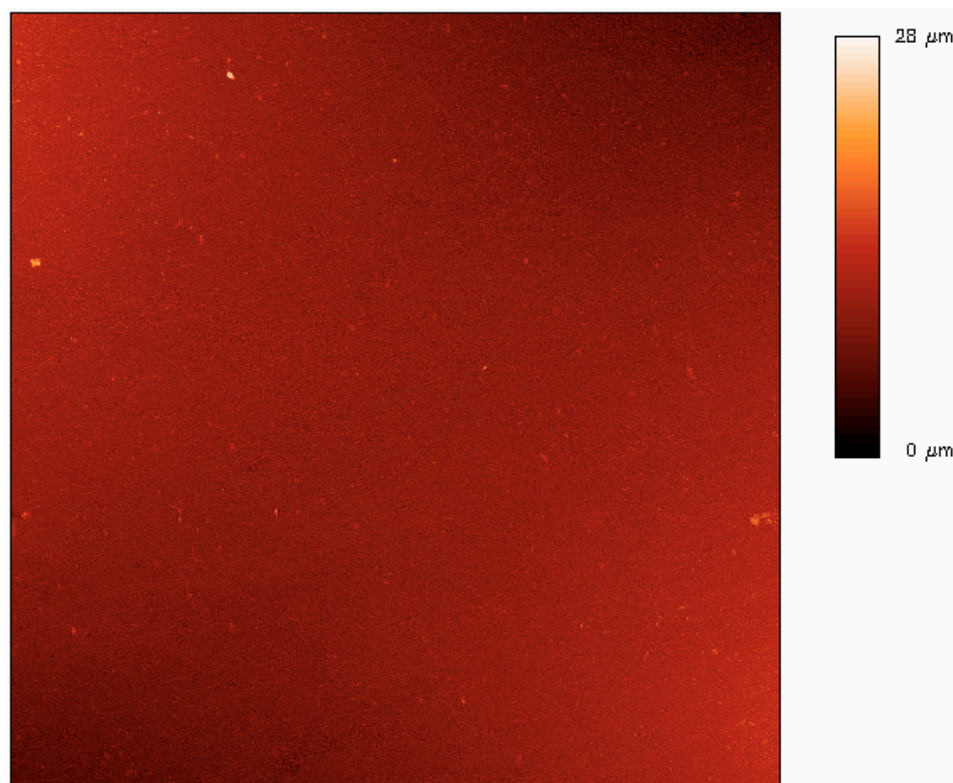
Obrázek 22 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 1C



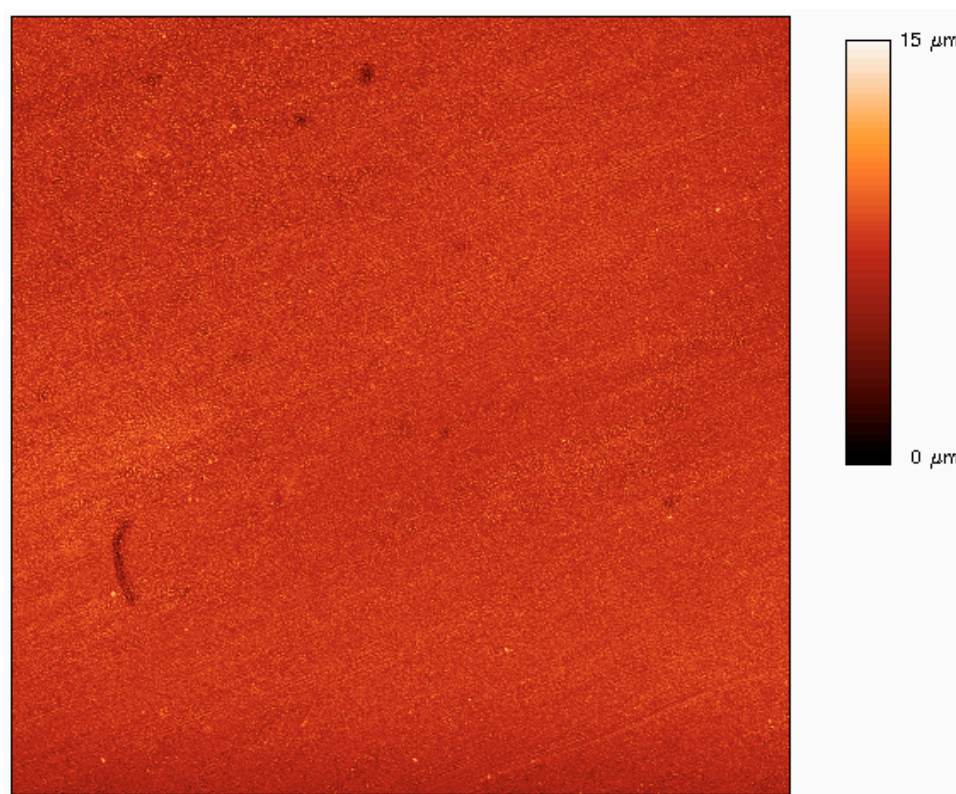
Obrázek 23 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 2C



Obrázek 24 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 3C



Obrázek 25 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 4C



Obrázek 26 – Detailní zobrazení 2D topografie povrchu 5C